



**Filipa Félix Medeiros dos Santos**

Licenciada em Ciências da Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

## **Controlo de Potência em Redes de Energia Elétrica com base num Reator de Núcleo Saturável**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
**Engenharia Eletrotécnica e de Computadores**

Orientador: Doutor Francisco Alexandre Ganho da Silva Reis,  
Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade  
Nova de Lisboa  
Co-orientador: Mestre Luís Filipe Romba Jorge,  
Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade  
Nova de Lisboa

Júri

Presidente: Doutor Rui Alexandre Nunes Neves da Silva  
Arguentes: Doutor Pedro Miguel Ribeiro Pereira  
Doutor Francisco Alexandre Ganho da Silva Reis



FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

**Setembro, 2019**



## **Controlo de Potência em Redes de Energia Elétrica com base num Reator de Núcleo Saturável**

Copyright © Filipa Félix Medeiros dos Santos, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade NOVA de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.



*Ao meu pai e à minha mãe*  
*Às minhas irmãs e irmão*  
*Aos meus avós*



## AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer às pessoas que me ajudaram na conclusão desta etapa marcante da minha vida.

Ao meu orientador Professor Doutor Francisco Reis e ao meu co-orientador Professor Mestre Luís Jorge, pela excelente orientação, disponibilidade e conselhos que me deram de forma a realizar esta dissertação.

Ao Engenheiro Nuno Amaro, do Nester, pela ajuda e disponibilidade que me prestou.

Ao Bruno Duarte, colega e companheiro, pela ajuda, carinho e compreensão neste meu percurso académico.

Aos meus colegas de curso, João Mouco, David Taranta, António Godinho e Tomás Rocha pela ajuda e companhia nas noites de estudo.

Ao meu pai, à minha mãe e avó Judite por toda a compreensão, todo o esforço que fizeram por mim e por me apoiarem em todas as ocasiões da minha vida. Nunca teria chegado aqui sem vocês.

Aos meus irmãos que sempre foram um apoio fundamental para mim. À minha irmã Sara, a minha melhor amiga e orgulho, à minha irmã Mariana pela força que me dá, ao meu irmão Henrique pela sabedoria que me transmite, à minha irmã Sofia e Ivan por me arrancarem sempre um sorriso.

Um grande obrigado a todos.





## RESUMO

---

Esta dissertação propõe uma solução para o problema do controle do fluxo de potência em redes de energia elétrica com base num dispositivo eletromagnético, o reator de núcleo saturável (RNS). A necessidade do controle de potência em ramos da rede torna-se relevante num contexto de crescente incerteza associada à presença de fontes de energia renovável podendo, em determinadas condições, provocar eventuais sobrecargas em ramos (linhas ou transformadores).

Foram testadas várias tipologias deste dispositivo e determinou-se a que melhor se ajusta ao controle do fluxo de potência na rede. Testes laboratoriais permitiram analisar o desempenho do dispositivo e determinar a tipologia que possibilita maior gama de variação de indutância, tendo em consideração os esquemas de ligação à rede e as propriedades físicas dos materiais que o constituem. Foi igualmente desenvolvido e proposto um sistema de controle do dispositivo quando inserido numa rede, de maneira a que este se ajuste perante alterações do fluxo de potências.

Através de ensaios laboratoriais e das simulações efetuadas, conclui-se que o RNS de ferro laminado com as bobinas laterais em série com a linha de transmissão permite um controle do fluxo de potência em ramos de uma rede de energia elétrica através da variação da sua indutância numa gama de operação compreendida entre [7,80 ; 34,50]mH.

**Palavras-chave:** Trânsito de Energia; RNS; Dispositivo Eletromagnético

---



## ABSTRACT

---

This dissertation proposes a solution for the power flow control issue on electric power grids, based on an electromagnetic device, the saturable core reactor (RNS). The need for power control on grid branches becomes relevant in a context of an increasing uncertainty associated with the presence of renewable energy sources and may, under certain conditions, cause overcharges on branches (lines or transformers).

Several types of this device have been tested, and the best fit for grid power flow control has been determined. Laboratory tests allowed the analysis of device performance, as well as, the determination of which type of device allows the greater range of inductance variation, considering the grid connection schemes and the physical properties of the used materials. A device control system has also been developed, and proposed for usage when placed into a grid, enabling its self-adjustment to possible changes in power flow.

Throughout laboratory tests and simulations, it was concluded that the laminated iron RNS with side coils in series and with the transmission line, allows branches power flow control of a power grid, through the variation of the its inductance in an operating range of [7,80 ; 34,50] mH.

**Keywords:** Power Flow; RNS; Electromagnetic Device

---



# ÍNDICE

<b>Lista de Figuras</b>	<b>xv</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>xvii</b>
<b>Siglas</b>	<b>xix</b>
<b>Lista de Símbolos</b>	<b>xxi</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Enquadramento e Motivação . . . . .	1
1.2 Objetivos . . . . .	1
1.3 Estrutura de Trabalho . . . . .	2
<b>2 Tecnologias Existentes para Controlo do Fluxo de Potência</b>	<b>3</b>
2.1 O Problema do Controlo de Potência em Linhas de Transmissão . . . . .	4
2.2 Dispositivos Convencionais . . . . .	5
2.2.1 Condensadores Shunt . . . . .	5
2.2.2 Condensadores Série . . . . .	5
2.2.3 Compensadores Síncronos . . . . .	6
2.3 Dispositivos FACTS . . . . .	6
2.3.1 SSSC - <i>Static Synchronous Series Compensator</i> . . . . .	7
2.3.2 SVC - <i>Static Var Compensator</i> . . . . .	8
2.3.3 STATCOM - <i>Static Synchronous Compensator</i> . . . . .	9
2.3.4 UPFC - <i>Unified Power Flow Controller</i> . . . . .	10
2.3.5 Exemplo de Aplicação . . . . .	11
2.4 Dispositivos Eletromagnéticos . . . . .	12
2.4.1 Reator Saturável para Controlo do Fluxo de Potência . . . . .	12
2.4.2 Amplificador Magnético para Controlo do Fluxo de Potência . . . . .	14
2.5 Conclusão . . . . .	15
<b>3 Tipologias e Implementações Laboratoriais do RNS</b>	<b>17</b>
3.1 Princípio de Funcionamento . . . . .	18
3.1.1 Ciclo de Histerese da Ferrite . . . . .	21
3.1.2 Ciclo de Histerese do Ferro Laminado . . . . .	22

3.1.3	Constituição . . . . .	23
3.2	Tipologias Possíveis para o RNS . . . . .	24
3.2.1	RNS de Ferrite com Bobinas Laterais em Série com a Linha . . . . .	24
3.2.1.1	Testes e Resultados . . . . .	25
3.2.2	RNS de Ferrite com Bobina Central em Série com a Linha . . . . .	27
3.2.2.1	Testes e Resultados . . . . .	29
3.2.3	RNS de Ferro Laminado com Bobina Central de Ajuste . . . . .	31
3.2.3.1	Testes e Resultados . . . . .	33
3.3	Conclusão . . . . .	35
<b>4</b>	<b>Controlo e Aplicação do RNS</b>	<b>37</b>
4.1	Trânsito de Energia . . . . .	38
4.1.1	Formulação Nodal . . . . .	38
4.1.2	Simulação PSS/E . . . . .	43
4.2	Controlo do Sistema . . . . .	45
4.2.1	Desenho do Controlo . . . . .	45
4.2.1.1	Microprocessador e Controlador da Fonte de Corrente DC	46
4.2.2	Simulação do Sistema de Energia em Matlab . . . . .	48
4.2.3	Simulação do Sistema de Energia em <i>Open Loop</i> com o HyperSIM	57
4.2.4	Conclusão . . . . .	66
<b>5</b>	<b>Conclusões e Trabalho Futuro</b>	<b>67</b>
5.1	Conclusões . . . . .	67
5.2	Trabalho Futuro . . . . .	68
	<b>Bibliografia</b>	<b>69</b>
<b>I</b>	<b>Anexos</b>	<b>71</b>
I.1	Dimensionamento do Dispositivo . . . . .	71
I.2	Desenho RNS . . . . .	72
I.3	Código Matlab . . . . .	73

## LISTA DE FIGURAS

2.1	Representação de um sistema AC com um condensador shunt [3] . . . . .	5
2.2	Esquema SSSC [6] . . . . .	7
2.3	Esquema do <i>Static Var Compensator</i> [8] . . . . .	8
2.4	Esquema do STATCOM [8] . . . . .	9
2.5	Esquema do dispositivo UPFC [10] . . . . .	10
2.6	Dispositivo SmartValve [12] . . . . .	11
2.7	Cenário antes e após sobrecarga [12] . . . . .	11
2.8	Esquema do reator para controlo do fluxo de potência [13] . . . . .	12
2.9	Rede sem reatância variável [13] . . . . .	13
2.10	Rede com reatância variável [13] . . . . .	13
2.11	Esquema do amplificador magnético adaptado de [14] . . . . .	14
2.12	Comparação das duas tecnologias de controlo de fluxo de potência [13] . . .	15
3.1	Ciclo de histerese [17] . . . . .	19
3.2	Variação incremental da permeabilidade magnética de um núcleo. . . . .	20
3.3	Ciclo de histerese e permeabilidade magnética incremental da ferrite [18] . .	21
3.4	Ciclo de histerese do ferro laminado [17] . . . . .	22
3.5	Curvas de características do ferro laminado de GNO . . . . .	22
3.6	Constituição de um reator de núcleo saturável com a bobina central como circuito de ajuste DC . . . . .	23
3.7	Constituição de um reator de núcleo saturável com a bobina central em série com a linha de transmissão . . . . .	23
3.8	Esquema de ligações do RNS e respetiva implementação em laboratório . . .	24
3.9	RNS de ferrite . . . . .	25
3.10	Valores da reatância do RNS . . . . .	26
3.11	Valores da indutância do RNS . . . . .	26
3.12	Esquema e respetiva implementação do RNS . . . . .	27
3.13	Reator de núcleo saturável . . . . .	28
3.14	Reatância indutiva da linha . . . . .	28
3.15	Curvas da reatância indutiva para diferentes valores de corrente . . . . .	29
3.16	Curvas da indutância para diferentes valores de corrente . . . . .	30
3.17	Esquema e implementação do RNS . . . . .	31

3.18	Linha de transmissão . . . . .	32
3.19	Dispositivo estudado . . . . .	32
3.20	Corrente percorrida no circuito . . . . .	33
3.21	Ensaio experimental do reator de núcleo magnético . . . . .	33
3.22	Gráfico resultante da indutância do núcleo magnético de ferro laminado . . . . .	34
4.1	Sistema em estudo com 3 barramentos . . . . .	40
4.2	Rede em estudo simulada no <i>PSS/E</i> . . . . .	43
4.3	Esquema da rede em estudo . . . . .	44
4.4	Esquema de controlo do SEE . . . . .	45
4.5	Gráfico da corrente na linha 2 em função da variação da indutância . . . . .	46
4.6	Gráficos para análise do comportamento de cada uma das correntes em cada uma das linhas . . . . .	46
4.7	Indutância do RNS variável em série com a indutância fixa da linha . . . . .	47
4.8	Modelo da rede com controlo semi-automático . . . . .	48
4.9	Modelo da rede inicial em <i>Simulink</i> . . . . .	49
4.10	Evolução das correntes iniciais em cada uma das linhas . . . . .	50
4.11	Modelo da rede final em <i>Simulink</i> . . . . .	52
4.12	Evolução das correntes em cada uma das linhas depois da introdução do RNS . . . . .	53
4.13	Gráfico da tensão e corrente inicial e final do B1 . . . . .	55
4.14	Gráfico da tensão e corrente inicial e final do B2 . . . . .	55
4.15	Gráfico da tensão e corrente inicial e final do B3 . . . . .	56
4.16	Laboratório Nester [20] . . . . .	57
4.17	Modelo da rede no software HyperSIM . . . . .	58
4.18	Gráficos para análise do comportamento das correntes iniciais em cada uma das linhas . . . . .	59
4.19	Evolução da tensão e corrente inicial no barramento 1, de geração . . . . .	61
4.20	Evolução da tensão e corrente inicial no barramento 2, da carga 1 . . . . .	61
4.21	Evolução da tensão e corrente inicial no barramento 3, da carga 2 . . . . .	62
4.22	Gráficos para análise do comportamento das correntes finais em cada uma das linhas . . . . .	63
4.23	Evolução da tensão e corrente final no barramento 1, de geração . . . . .	65
4.24	Evolução da tensão e corrente final no barramento 2, da carga 1 . . . . .	65
4.25	Evolução da tensão e corrente final no barramento 3, da carga 2 . . . . .	66
I.1	Protótipo desenvolvido por [21] . . . . .	71
I.2	Ilustração do RNS de ferrite . . . . .	72
I.3	Ilustração do RNS de ferro laminado . . . . .	72
I.4	Interface gráfica de desenvolvimento do ambiente de simulação . . . . .	73



## LISTA DE TABELAS

2.1	Custo dos dispositivos convencionais [3] . . . . .	15
2.2	Custo das tecnologias FACTS [3] . . . . .	15
3.1	Especificações da reatância indutiva da linha . . . . .	28
3.2	Especificações da linha de transmissão . . . . .	32
3.3	Características do reator de núcleo magnético . . . . .	34
4.1	Dados de dimensionamento das linhas . . . . .	40
4.2	Dados de dimensionamento das cargas . . . . .	41
4.3	Dados de dimensionamento da geração . . . . .	42
4.4	Valores trifásicos . . . . .	43
4.5	Valores monofásicos . . . . .	44
4.6	Correntes nas linhas do modelo da rede inicial . . . . .	50
4.7	Potências transitadas no modelo da rede inicial . . . . .	51
4.8	Potências aparentes iniciais em cada uma das linhas . . . . .	51
4.9	Correntes nas linhas do modelo da rede após introdução do RNS . . . . .	53
4.10	Potências transitadas no modelo da rede final . . . . .	54
4.11	Potências aparentes finais em cada uma das linhas . . . . .	54
4.12	Tensão e potências geradas e consumidas em cada um dos barramentos . . . . .	58
4.13	Correntes iniciais na rede . . . . .	59
4.14	Fluxo de potência da rede base . . . . .	60
4.15	Tensão e potências geradas e consumidas em cada um dos barramentos após a introdução do dispositivo . . . . .	62
4.16	Correntes resultantes na rede após a introdução do RNS . . . . .	63
4.17	Fluxo de potência após a introdução do RNS . . . . .	64



## SIGLAS

**AC** *Alternating Current*

**AT** *Alta Tensão*

**DC** *Direct Current*

**DSR** *Demand Side Response*

**FACTS** *Flexible AC Transmission Systems*

**HIL** *Hardware-In-the-Loop*

**MAPFC** *Magnetic Amplifier - based Power Flow Controller*

**MAT** *Muito Alta Tensão*

**REE** *Redes de Energia Elétrica*

**RNS** *Reator de Núcleo Saturável*

**SEE** *Sistemas de Energia Elétrica*

**SI** *Sistema Internacional*

**SRPFC** *Saturable Reactor for Power Flow Control*

**SSSC** *Static Synchronous Series Compensator*

**STATCOM** *Static Synchronous Compensator*

**SVC** *Static Var Compensator*

**UPFC** *Unified Power Flow Controller*



## LISTA DE SÍMBOLOS

$\Psi$  Fluxo Magnético

$\mu$  Permeabilidade Magnética

$\ell$  Comprimento do Solenoide

$\phi$  Desfasagem entre a Tensão e a Corrente

$I_C$  Corrente Contínua

$X_L$  Reactância Indutiva

**B** Densidade do Fluxo Magnético ou Campo de Indução Magnética

**H** Intensidade do Campo Magnético

**L** Indutância ou coeficiente de auto-indução

**N** Número de Espiras

**P** Potência Ativa

**Q** Potência Reativa

**R** Resistência Elétrica

**S** Potência Aparente

**Z** Impedância



## INTRODUÇÃO

### 1.1 Enquadramento e Motivação

No panorama atual das redes de transporte de energia, constata-se uma crescente procura de energias renováveis para responder a desafios estratégicos europeus. A utilização de energias renováveis e o aparecimento de gerações com comportamento intermitente, como sejam as eólicas numa rede de energia elétrica, aumenta as incertezas quanto ao trânsito de energia visto que não há previsão da influência que poderá ter na dinâmica da rede.

Estas incertezas quando não são controladas, podem provocar sobrecargas na rede. Para solucionar esta situação, é cada vez mais importante utilizar técnicas de controlo do fluxo de energia na rede de forma a prevenir eventuais sobrecargas e otimizar a gestão dos recursos disponíveis. O carácter incerto das fontes apresenta um grande desafio para o operador, que deve gerir os fluxos bidirecionais e resolver problemas no balanço do sistema.

Para aumentar a controlabilidade da rede, um dos métodos clássicos pode implicar o ajuste das unidades de geradores para controlar o fluxo, utilizar o método DSR que consiste na alteração do perfil do consumo de uma rede de energia elétrica de modo a permitir maior flexibilidade de operação [1], ou por último através da variação da topologia da rede.

### 1.2 Objetivos

Pretende-se neste trabalho analisar, modelizar e testar um dispositivo baseado num reator de núcleo saturável que permite a variação da indutância da linha de uma rede elétrica, conforme o seu estado de carga. Isto poderá permitir controlar eventuais sobrecargas sem recorrer aos métodos convencionais, como os condensadores shunt, condensadores série

e compensadores síncronos, que são complexos e dispendiosos. Nesta dissertação será abordado um método alternativo que previne eventuais cenários de sobrecarga da linha, de forma a cumprir todos os critérios de segurança e qualidade da rede. Com o auxílio do reator de núcleo saturável, será averiguada a possibilidade de a corrente ser distribuída uniformemente pela rede através da modelação da impedância da linha.

Numa fase inicial, várias configurações do RNS serão analisadas e determinada a que melhor se ajusta ao controlo do fluxo de corrente na rede. Mediante a realização de provas laboratoriais será posteriormente desenvolvido o controlo do dispositivo quando inserido numa rede. Foram efetuados procedimentos laboratoriais onde se analisaram três configurações possíveis e examinadas as características de funcionamento com o auxílio do material disponível.

Numa fase final, os resultados serão analisados e comparados com o auxílio do *Simulink* (ferramenta do *Matlab*), do *PSS/E* pertencente à *Siemens* e do *HyperSIM* no laboratório R&D Nester situado na REN, S.A.

### 1.3 Estrutura de Trabalho

Esta dissertação divide-se em cinco capítulos, sendo o primeiro reservado para a introdução, enquadramento e objetivos.

No **segundo capítulo** serão abordadas algumas das tecnologias existentes para o controlo do fluxo de potência bem como as suas diferenças, vantagens e desvantagens.

No **terceiro capítulo** é indicado o procedimento de cada implementação para determinação da que melhor se adequa ao controlo do fluxo de potência no sistema de energia bem como os resultados obtidos de cada uma das implementações que levaram à configuração final.

No **quarto capítulo**, será apresentado o controlo aplicado ao sistema bem como todo o procedimento que permitiu a sua implementação. Os resultados provenientes da introdução do RNS no sistema foram obtidos por simulação com o auxílio do *Simulink* e do *HyperSIM*.

O **quinto e último capítulo** é destinado às conclusões da dissertação bem como identificação dos possíveis trabalhos futuros.



## TECNOLOGIAS EXISTENTES PARA CONTROLO DO FLUXO DE POTÊNCIA

Neste capítulo, serão abordadas várias tecnologias de controlo do fluxo de potência numa rede de energia elétrica. Desde os dispositivos convencionais, como os condensadores shunt, condensadores série e compensadores síncronos, aos dispositivos FACTS que são definidos como sistemas de transmissão flexível de corrente alternada que controlam o fluxo de energia e melhoram a estabilidade da rede. Por último, serão abordados os dispositivos eletromagnéticos que controlam a magnetização do núcleo ferromagnético a fim de modelar a impedância da linha para proceder ao controlo de fluxo de potência.

## 2.1 O Problema do Controlo de Potência em Linhas de Transmissão

Nos sistemas de energia elétrica o controlo do fluxo de potência e a tensão ao longo da rede apresenta um grande desafio para as empresas de distribuição. Contudo, devido aos avanços tecnológicos na eletrônica de potência, é possível introduzir ferramentas no controlo e planeamento de um SEE.

A potência transitada numa linha de transmissão deve ser concordante com a sua capacidade de transporte, porém, há vários fatores que condicionam essa capacidade.

A capacidade de transporte de uma linha elétrica é condicionada pelo aumento de temperatura resultante das perdas por efeito de Joule, provocadas pela passagem de corrente elétrica. Os condutores das linhas aéreas dilatam-se pelo aumento de temperatura, que conduz ao aumento da sua flecha que terá de obedecer aos mínimos regulamentados[2].

O valor da potência ativa que a linha pode transportar corresponde ao limite de estabilidade de tensão. Quando a potência ativa da carga atinge um valor limite, ocorre um colapso de tensão, resultando na instabilidade do sistema, como tal, é fundamental assegurar a estabilidade da tensão ao longo de todo o sistema. Para maximizar a capacidade de transferência de potência ativa, é necessário minimizar o trânsito de potência reativa nos elementos da rede.

Com a compensação do fator de potência é possível reduzir sobrecargas, diminuir os riscos de falha e aumentar o tempo de vida útil dos equipamentos. Porém, a introdução de condensadores para compensação do fator de potência dá origem a harmónicas de tensão e corrente que conduzem a perdas de potência adicionais. Disso resulta um impacto negativo na produção, transporte e distribuição de energia elétrica. A existência de harmónicas implica que o fator de potência não coincida com o desfasamento entre a tensão e a corrente.

O controlo de potência convencional passa por controlar a potência ativa nos grupos geradores, proceder à gestão de potência do lado da carga, ou alterar a linha através de dispositivos de modo a aumentar a controlabilidade da rede.

Nas próximas secções serão analisados os dispositivos convencionais, FACTS, e eletromagnéticos.

## 2.2 Dispositivos Convencionais

### 2.2.1 Condensadores Shunt

Os condensadores shunt são instalados em paralelo com a carga e têm como principal objetivo a correção do fator de potência. Este dispositivo que está conectado à linha constitui uma injeção de corrente no ponto de ligação. A redução da potência reativa diminui as perdas na rede e aumenta a capacidade de transferência de energia. Na figura 2.1 apresenta-se uma rede de distribuição em que  $X$  e  $R$  representam as características da linha, a reatância e a resistência, respetivamente.

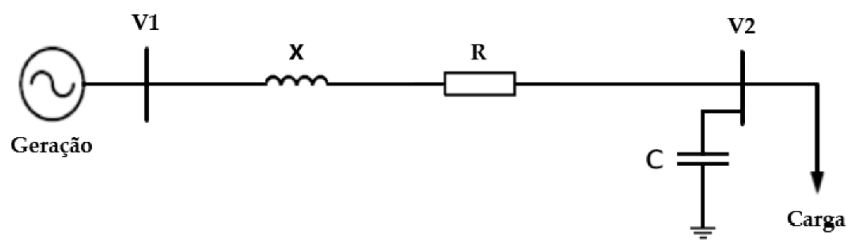


Figura 2.1: Representação de um sistema AC com um condensador shunt [3]

A tensão  $V1$  é a tensão associada ao barramento 1, de geração, e  $V2$ , é a tensão associada ao barramento 2, que contém a carga 2 que está em paralelo com o condensador  $C$ . A sua aplicação resulta num aumento da potência de transmissão que controla o perfil de tensões ao longo da rede. Os condensadores shunt compensam a potência reativa absorvida pela carga, tal como o STATCOM que será abordado na secção 2.3.3. A aplicação do condensador shunt numa rede de transmissão de energia, tem como objetivo aumentar a potência transmitida do gerador para a carga, o que resulta numa melhoria da estabilidade da rede [2].

### 2.2.2 Condensadores Série

Os condensadores em série, tal como o nome indica, são colocados em série com a linha de transmissão com o propósito de reduzir a sua reatância longitudinal. Esta redução implica um aumento da potência máxima transmissível e um decréscimo das perdas de potência reativa.

O banco de condensadores é ligado diretamente aos terminais da carga. A potência reativa deverá ser gerada localmente, onde é consumida pelas cargas, tipicamente indutivas, uma vez que a sua transferência ao longo das linhas provoca quedas de tensão. Quando isto se verifica, o perfil de tensões é aproximadamente uniforme [2].

Os condensadores em série compensam a potência reativa absorvida pela reatância da linha. Estes condensadores são utilizados no transporte a longa distância em linhas de MAT.

### 2.2.3 Compensadores Síncronos

Os compensadores síncronos são um meio de regulação de tensão e são usados para receber ou fornecer potência reativa da rede. São semelhantes aos motores síncronos que funcionam em vazio e produzem ou consomem energia reativa dependendo do valor da corrente de excitação. A potência trocada com a rede pode ser positiva, e funcionar como condensador síncrono, ou a troca pode ser negativa, que atua como uma reatância síncrona.

Contudo, esse aumento resulta na redução da impedância equivalente vista do local em que o compensador é instalado, o que melhora a regulação de tensão [2].

Os compensadores síncronos justificam-se em redes de transporte de energia a longa distância dado o elevado investimento.

## 2.3 Dispositivos FACTS

Os dispositivos FACTS (*Flexible AC Transmission Systems*) são tecnologias que fornecem controlo do fluxo de energia à rede e melhoram a sua estabilidade, o que possibilita o aumento de transmissão de potência. Há um crescente interesse para o mercado de eletricidade na operação e manutenção destes dispositivos para que o fornecimento de energia seja económico e de qualidade. A tecnologia FACTS é definida pelo *IEEE* como um sistema de transmissão flexível de corrente alternada que incorpora eletrónica de potência para melhorar a capacidade de controlo e de transferência de potência [4].

Estes dispositivos podem ser classificados em três categorias: [3]

- Os controladores série (SSSC) operam com base na variação da impedância da linha e têm máximo controlo na estabilidade do SEE;
- Os controladores shunt (SVC e STATCOM) têm como princípio o controlo de tensão o que proporciona máximo controlo na qualidade da tensão;
- A combinação dos controladores shunt e dos controladores série como o caso da tecnologia UPFC possibilitam controlo adicional no fluxo de potência e aumento na qualidade e estabilidade da tensão.

Seguidamente serão enumeradas várias tecnologias FACTS e será feita uma análise da constituição de cada dispositivo bem como examinadas as suas funcionalidades.

### 2.3.1 SSSC - *Static Synchronous Series Compensator*

O SSSC é um controlador série pertencente à categoria FACTS que utiliza eletrônica de potência para controlar o trânsito de energia, melhorar a estabilidade transitória do SEE e o seu desempenho. Este tipo de dispositivo FACTS consegue controlar o trânsito de potência, alcançando o valor desejado de potência ativa e reativa [5]. O esquema deste dispositivo está ilustrado na figura 2.2 e é constituído por um conversor de fonte de tensão que gera tensão AC controlável à frequência fundamental, e está ligado em série com a linha de transmissão acoplado por um transformador. Está equipado com um dispositivo de armazenamento de energia que proporciona trocas de potência ativa e reativa com o sistema de energia elétrica [6].

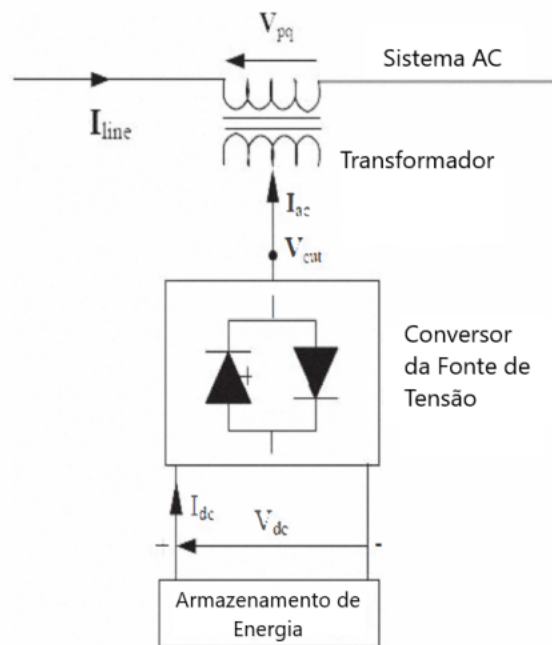


Figura 2.2: Esquema SSSC [6]

O gerador síncrono estático é um compensador em série, cuja tensão de saída está em quadratura com a corrente na linha, com o propósito de aumentar ou diminuir a queda de tensão ao longo da linha e assim, controlar a potência transmitida. A compensação reativa será negativa quando o compensador série opera em modo indutivo, e será positiva quando o compensador série opera no modo capacitivo [6]. Quando a tensão injetada está em avanço relativamente à corrente da linha, produz uma reatância capacitiva em série com a linha que provoca um aumento na corrente assim como um aumento no fluxo de potência. Quando a tensão injetada está com um atraso em relação à corrente na linha, será criada uma reatância indutiva em série com a linha, que causa um decréscimo na corrente bem como no fluxo de potência [5].

### 2.3.2 SVC - *Static Var Compensator*

O SVC é uma das tecnologias que proporciona compensação da potência reativa fornecendo um fator de potência próximo da unidade, aumentando deste modo a capacidade de transferência de potência e minimizando as perdas na linha de transmissão.[7]

Na figura 2.3 está ilustrada a constituição do compensador estático, que utiliza um condensador que está em paralelo com as bobinas controladas por tiristores, para fornecer ou absorver potência reativa da rede. Estes são coordenados por um ângulo de disparo que é definido por um sistema de controlo que monitoriza a tensão no barramento e é dependente do valor da tensão de referência. Pode ser ligado diretamente ao barramento cuja tensão se pretende regular ou através de um transformador no caso de redes MAT [2].

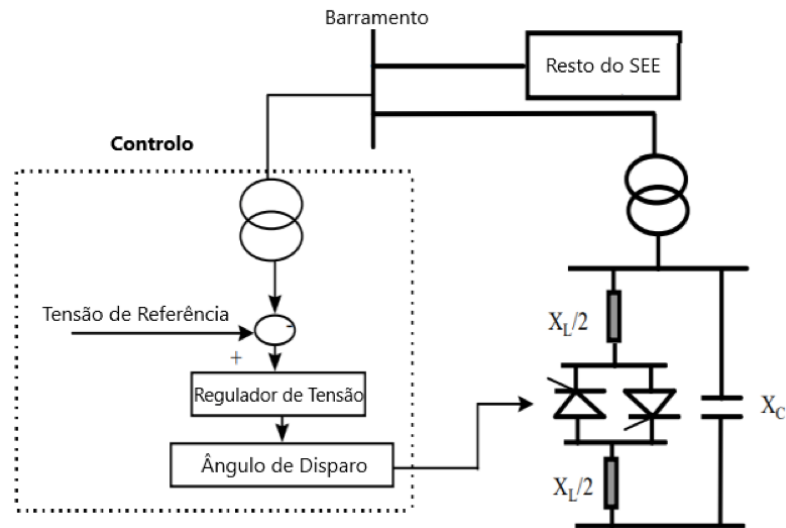


Figura 2.3: Esquema do *Static Var Compensator* [8]

O SVC regula a tensão num determinado nó da rede pelo controlo da quantidade de potência reativa injetada ou absorvida pelo sistema. Quando a tensão do sistema está abaixo do limite, o SVC gera potência reativa, funcionando como compensador capacitivo, quanto está acima do limite, absorve potência reativa, atuando como compensador indutivo [7]. Ao regularizar a tensão, estabelece-se a capacidade de manter a tensão definida dentro dos limites estipulados pelos órgãos reguladores. Adicionalmente, o SVC corrige o fator de potência do nó ao qual está conectado, o que conduz a um aumento de eficiência da linha de transmissão [4]. O SVC pode também ser modelizado como uma fonte de energia reativa variável [3]. É vantajoso compensar a potência reativa da rede, visto que o valor da potência de perdas é minimizado e a capacidade de transmissão da linha, tal como o fornecimento de tensão, são mantidos [3].

### 2.3.3 STATCOM - *Static Synchronous Compensator*

A tecnologia STATCOM é um dos dispositivos pertencentes à categoria FACTS que opera como regulador de tensão. Para regular o fator de potência do sistema e manter a estabilidade de tensão, é necessário compensar a potência reativa. Esta tecnologia é instalada para auxiliar redes elétricas que têm problemas com o fator de potência e com a regulação de tensão. Na figura 2.4 está demonstrado o esquema do STATCOM constituído por um conversor de fonte de tensão, que tanto gera como absorve potência reativa, conectado ao SEE através de um transformador [9].

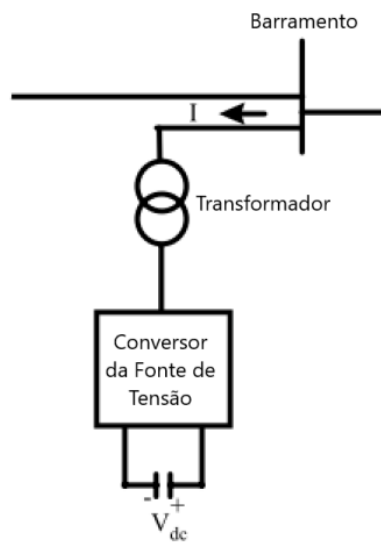


Figura 2.4: Esquema do STATCOM [8]

Este dispositivo filtra harmônicas de corrente e favorece a estabilidade do sistema, levando ao máximo a potência ativa que pode ser transmitida. Reduz o custo de transmissão de energia reativa para a carga e aumenta a capacidade total da linha de transmissão.

É um dispositivo estático, ao contrário do compensador síncrono, e gera ou absorve potência reativa rapidamente visto que não possui partes móveis [9]. A potência reativa aos terminais do STATCOM depende da amplitude da fonte de tensão, se a tensão aos terminais do conversor for superior à tensão AC no ponto de ligação, o STATCOM gera potência reativa, por outro lado, quando a amplitude da fonte de tensão é inferior à tensão AC, este absorve potência reativa. O STATCOM permite suporte de potência reativa de melhor qualidade a tensões baixas, visto que a potência reativa do STATCOM decresce linearmente com a tensão AC.

#### 2.3.4 UPFC - *Unified Power Flow Controller*

O controlador unificado de fluxo de potência UPFC é o mais versátil de todos os sistemas FACTS, visto que é capaz de maximizar a capacidade de transferência de potência nos sistemas de transmissão de energia. Apesar do complexo equipamento de eletrônica de potência aplicado ao controlo e à optimização do fluxo de potência, este dispositivo beneficia de ser uma combinação do controlador série e do controlador shunt, o que possibilita um maior controlo no trânsito de energia bem como na qualidade e estabilidade da tensão [3] [10]. Este dispositivo é uma combinação do STATCOM 2.3.3 e do SSSC 2.3.1, em que cada um dos conversores das fontes de tensão interagem por um condensador, o que permite um fluxo bidirecional de potência ativa entre os terminais do dispositivo, conforme explicitado na figura 2.5.

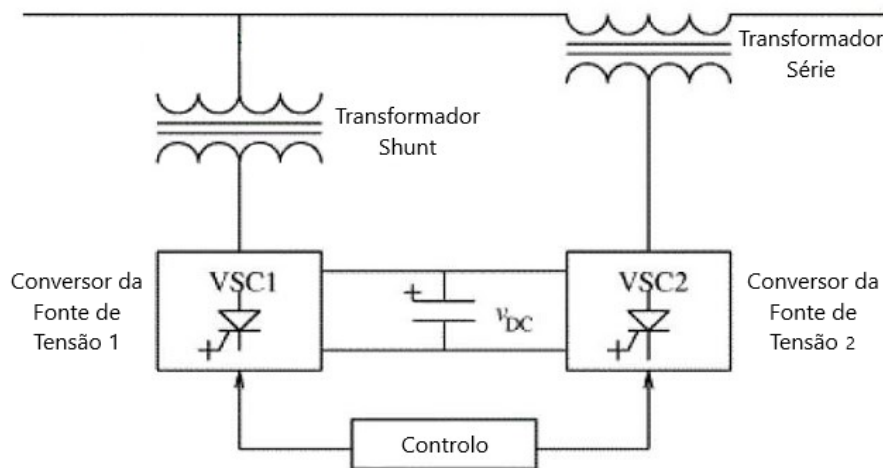


Figura 2.5: Esquema do dispositivo UPFC [10]

O bloco de controlo dos conversores, injeta tensão cujo ângulo de fase é idêntico ao da tensão da linha para controlar o fluxo de potência ativa e reativa na linha de transmissão. Consequentemente o conversor irá efetuar trocas de potência ativa e reativa com a linha. Este dispositivo é capaz de controlar individualmente ou simultaneamente o fluxo de potência na linha e a tensão no respetivo barramento [10].



### 2.3.5 Exemplo de Aplicação

A *Smart Wires Inc* é uma empresa que desenvolveu o *SmartValve*, um dispositivo monofásico baseado num SSSC, descrito na secção 2.3.1. O *SmartValve* aumenta ou diminui a reatância de um dado circuito facultando o controlo do fluxo de energia em tempo real [11].



**SmartValve 2000 Series**

Figura 2.6: Dispositivo SmartValve [12]

Esta solução permite que se module a rede conforme necessário. É uma solução de rápida implementação, é instalado em série com a linha e não necessita de equipamento auxiliar. Tal como dito anteriormente, este dispositivo funciona em série com a linha, a tensão injetada simula uma reatância que aumenta a reatância da linha, em que o intervalo de injeção de tensão é determinado pela corrente instantânea da linha.

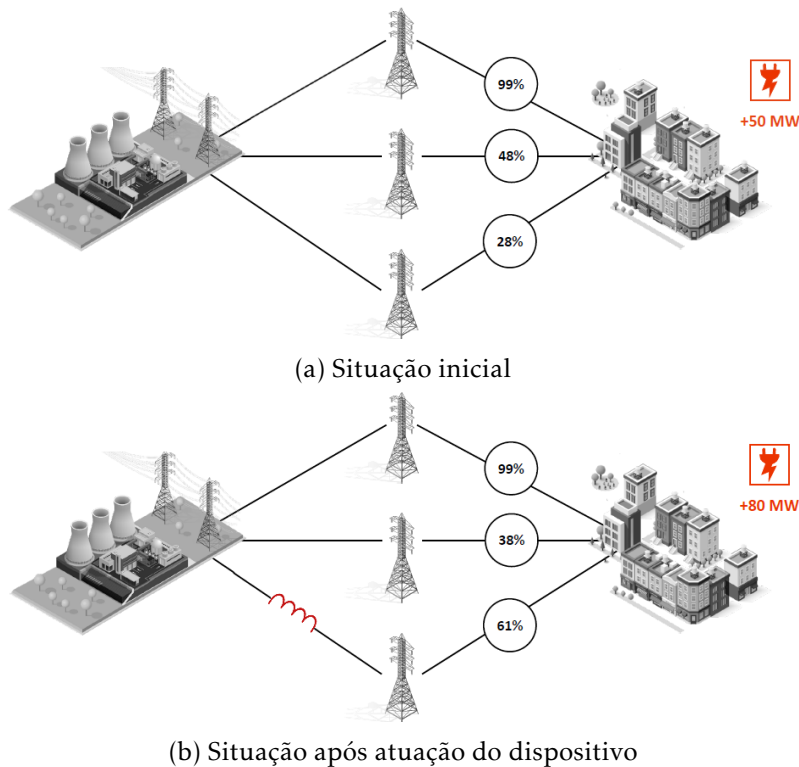


Figura 2.7: Cenário antes e após sobrecarga [12]

No cenário da figura 2.7, apresenta-se uma rede com três barramentos com um grupo gerador a alimentar uma carga de  $P = 50$  MW. A primeira linha encontra-se em risco de sobrecarga, pelo que se introduziu o dispositivo na terceira linha da rede. A carga da primeira linha manteve-se, na segunda a carga diminuiu e na terceira aumentou. O que resultou num aumento de potência de carga a alimentar de  $P = 80$  MW.

Através de um transformador de corrente, o *SmartValve* adquire corrente da linha de transmissão e transforma-a de alternada para contínua. De seguida, torna a transformar-se em corrente alternada com a amplitude e frequência da forma de onda de tensão desejada. A injeção da fonte de tensão proporciona estabilidade de tensão, para além do controlo do fluxo de potência [12].

Ao contrário dos condensadores e reatores convencionais, o *SmartValve* injeta tensão independentemente da corrente da linha. Este dispositivo tanto pode ser instalado numa linha de 220kV como numa de 400kV.

## 2.4 Dispositivos Eletromagnéticos

### 2.4.1 Reator Saturável para Controlo do Fluxo de Potência

O reator saturável para controlo do fluxo de potência, (*SRPFC - Saturable Reactor for Power Flow Control*) fornece modelação contínua da impedância da linha alternando a corrente de um enrolamento DC para controlar a magnetização do núcleo ferromagnético, variando assim a reatância do enrolamento AC [13].

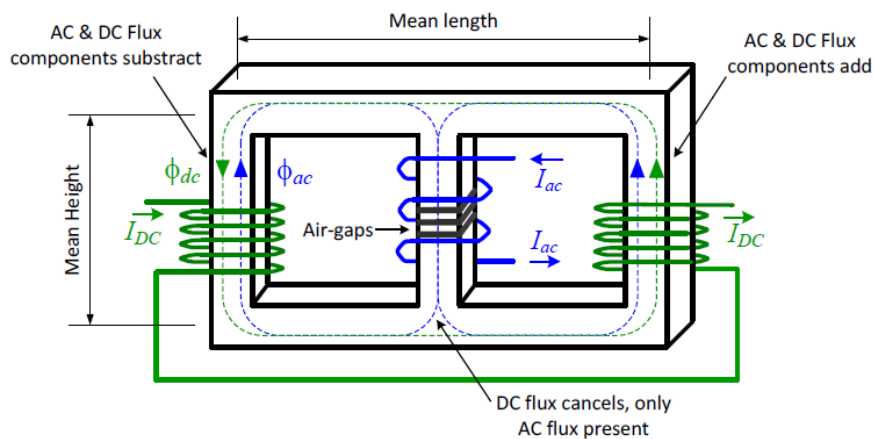


Figura 2.8: Esquema do reator para controlo do fluxo de potência [13]

A figura 2.8 ilustra a operação monofásica do protótipo SRPFC que é constituído por um núcleo com três colunas retangulares e entreferro na coluna central. O núcleo é composto por um material, que é utilizado nos transformadores dos sistemas de potência, que possui perdas relativamente baixas. Os enrolamentos DC estão situados nas colunas exteriores, e o enrolamento AC na coluna central. Esta configuração permite que se atinja

a saturação do núcleo com o auxílio de uma fonte de alimentação DC. O ajuste da polarização DC faz com que o ponto de funcionamento da curva de característica B-H se mova e parametrize a indutância relativa no enrolamento AC central. Isto conduz à modelação do fluxo de potência dentro dos limites estipulados. Os enrolamentos DC das colunas laterais, estão eletricamente ligados em série e enrolados numa certa direção, que num dado meio ciclo, os fluxos AC e DC anulam-se num dos lados do núcleo e adicionam-se no outro. No próximo meio ciclo, o enrolamento direito e esquerdo do núcleo vão operar em estados diferentes. Em condições nominais, a polarização DC controla a reatância indutiva e a corrente AC varia em função dessa reatância [13].

Considera-se na figura 2.9 uma rede que contém três barramentos e três linhas de igual impedância por unidade de comprimento. O grupo gerador ligado ao barramento 1 fornece uma potência de  $P = 262,3$  MW à rede que alimenta uma carga de  $P = 250$  MW, situada no barramento 3. Para as condições operacionais indicadas, este ramo encontra-se em sobrecarga, enquanto que os outros troços operam abaixo da potência nominal.

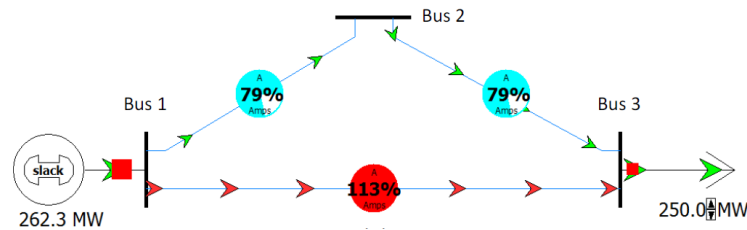


Figura 2.9: Rede sem reatância variável [13]

Este cenário é indesejável, pelo que a solução para este problema passa por aplicar um reator em série com a linha sobrecarregada, como demonstra a seguinte figura 2.10.

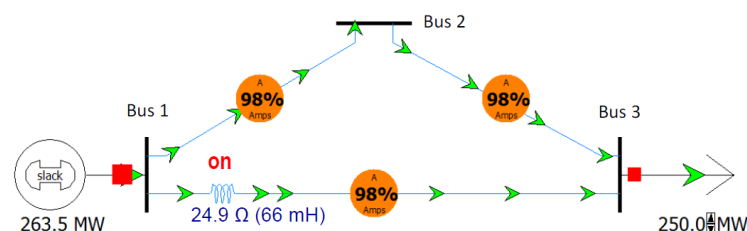


Figura 2.10: Rede com reatância variável [13]

Com a utilização do reator com uma indutância de  $L = 66$  mH, ligada em série com a linha sobrecarregada, é possível controlar o fluxo de corrente na rede de forma a manter todas as linhas abaixo da potência nominal. A carga na linha em sobrecarga é reduzida para 98% do limite máximo enquanto que as restantes linhas suportam a carga excedentária.

### 2.4.2 Amplificador Magnético para Controlo do Fluxo de Potência

O controlo do fluxo de potência baseado num amplificador magnético, (*MAPFC - Magnetic Amplifier based Power Flow Controller*) é um dispositivo económico utilizado em sistemas de energia eléctrica que se fundamenta em princípios do eletromagnetismo para o controlo de fluxo de potência.

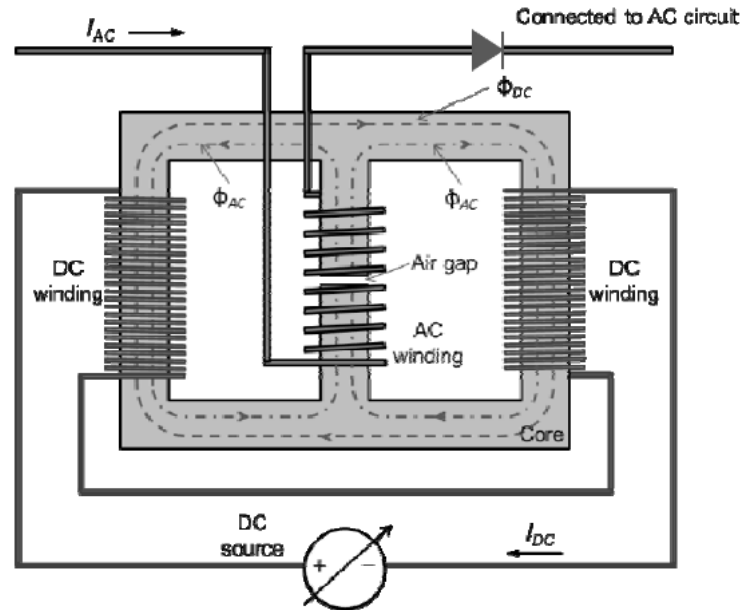


Figura 2.11: Esquema do amplificador magnético adaptado de [14]

O amplificador magnético é constituído por duas bobinas laterais que são percorridas por corrente contínua para gerar fluxo magnético circulante na armação externa do núcleo. Este dispositivo, possui um enrolamento AC central, que está ligado em série com o circuito de corrente alternada, e os enrolamentos DC são conduzidos por uma fonte de corrente contínua. Os enrolamentos estão magneticamente ligados pelos fluxos de corrente contínua e alternada no núcleo.

O fluxo polarizado DC controla a saturação do núcleo que provoca a auto-indução do enrolamento AC. O controlo do fluxo de corrente no circuito de corrente alternada é determinado pelo ajuste de entrada de corrente contínua no enrolamento DC.

A maior parte do fluxo de corrente contínua mantém-se nos ramos periféricos do núcleo, isto permite a saturação do núcleo por uma corrente contínua relativamente pequena e a reatância do enrolamento AC atinge facilmente o valor mínimo.

O MAPFC adota o mesmo princípio que o SRPFC, o seu funcionamento assenta no controlo da reatância do enrolamento AC que está em série com a linha [14]. A diferença do amplificador magnético para o reator de núcleo saturável para controlo do fluxo de potência 2.4.1 indica que a saída do amplificador magnético tem de ser sempre retificada. Esta diferença está ilustrada na figura 2.12.

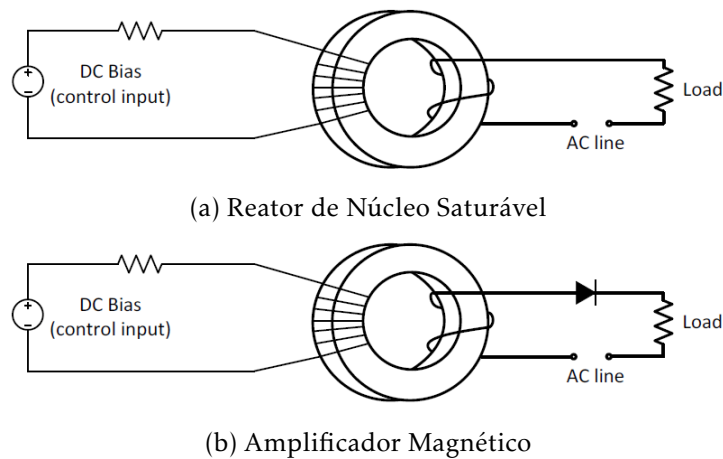


Figura 2.12: Comparação das duas tecnologias de controlo de fluxo de potência [13]

## 2.5 Conclusão

Existem várias possibilidades de controlo do fluxo de potência numa linha de transmissão. O controlo da tensão em cada um dos barramentos, a variação da reatância da linha de transmissão e a compensação do fator de potência, são funções desempenhadas pelos dispositivos descritos [15].

A principal diferença apresentada pelos dispositivos FACTS, comparativamente aos dispositivos convencionais, deve-se à incorporação de eletrónica de potência nos sistemas de energia elétrica.

As seguintes tabelas 2.1 e 2.2 explicitam o custo por kVAr de algumas tecnologias de controlo de fluxo de potência. (Dados de 2015)

Tabela 2.1: Custo dos dispositivos convencionais [3]

Dispositivos Convencionais	Custo [USD/kVAr]
Condensador Shunt	8
Condensador Série	20

Tabela 2.2: Custo das tecnologias FACTS [3]

Dispositivos FACTS	Custo [USD/kVAr]
SVC	40
STATCOM	50
UPFC	50

Os dispositivos SVC e STATCOM, têm a capacidade de efetuar trocas de potência reativa com a rede, pelo que são dispositivos utilizados como reguladores de tensão. São também usados para melhorar a estabilidade transitória do sistema de energia. A instabilidade transitória resulta de desequilíbrios de potência ativa entre a geração e a carga [2]. O SVC em comparação com o STATCOM, tem um tempo de resposta mais rápido e melhor capacidade de compensação de potência reativa. No entanto, o STATCOM permite melhor suporte de potência reativa em sistemas de baixa tensão uma vez que a potência reativa do STATCOM diminui linearmente com a tensão AC. Isto reduz a necessidade da utilização de um filtro para as harmónicas de corrente [5].

O dispositivo SSSC tem a capacidade de variar a reatância da linha de transmissão e a possibilidade de conexão com um armazenamento de energia que possibilita trocas de potência ativa com o sistema de energia elétrica [5]. Os sistemas de armazenamento de energia são necessários quando a potência ativa está envolvida no fluxo de potência.

O dispositivo UPFC é um combinado do controlador série e do controlado shunt, o que proporciona melhor controlo de fluxo de potência, corrente e tensão na linha. Tem a vantagem do controlo independente da potência ativa e reativa.

Apesar de todas as vantagens destes dispositivos FACTS, todos eles são complexos em termos de funcionalidade e dispendiosos em termos de instalação. Tal limita a viabilidade do controlo de fluxo na rede de energia contemporânea [13].

Como potencial alternativa, os dispositivos eletromagnéticos fornecem modulação contínua da impedância da linha para controlar a magnetização do núcleo ferromagnético. Esta tecnologia é barata e de simples controlo, no entanto a sua utilização reduz o tempo de vida do equipamento [15].

## TIPOLOGIAS E IMPLEMENTAÇÕES LABORATORIAIS DO RNS

No presente capítulo, serão apresentados os princípios básicos de funcionamento de um reator de núcleo saturável. O RNS fornece modulação contínua da reatância de uma linha de transmissão através da magnetização do núcleo ferromagnético. Serão testados dois núcleos, um de ferrite e outro de ferro laminado, com diferentes configurações para determinar a configuração que melhor se adequa ao controle do fluxo de corrente numa rede de energia elétrica.

### 3.1 Princípio de Funcionamento

O reator de núcleo saturável fornece modelação contínua da reatância indutiva de uma linha de transporte de energia pelo controlo da magnetização de um núcleo ferromagnético. Ao variar a reatância indutiva, definindo um intervalo de variação da indutância, é possível variar a corrente que flui num circuito. O fluxo de corrente magnética é descrito pela seguinte equação:

$$\Psi = Li \quad (3.1)$$

Em que  $L$  representa a indutância ou coeficiente de auto-indução, medida em  $H$  (Henry), e relaciona o fluxo magnético  $\Psi$ , medido em  $Wb$  (Weber), com a corrente eléctrica  $i$ , medida em  $A$ , Ampere.

O processo de variação é contínuo se for possível variar de forma contínua a indutância. A expressão genérica que permite calcular a indutância, em  $H$ , de um solenoide está descrita na seguinte equação:

$$L = \frac{4\pi N^2 S \mu}{\ell} \quad (3.2)$$

Em que  $N$  é o número de espiras,  $S$  é a superfície transversal em  $cm^2$ ,  $\mu$  é a permeabilidade magnética medida em  $Hm^{-1}$  e  $\ell$  representa o comprimento do solenoide em  $cm$ .

Uma vez construído o solenoide, os parâmetros não podem ser alterados e a única alternativa para modelizar a indutância passa por variar a permeabilidade magnética.

A lei de Ampere é uma das equações de Maxwell que descreve o eletromagnetismo. É definida pelo integral da intensidade do campo magnético  $H$ , ao longo de um caminho fechado.

$$\oint_{\gamma} H \cdot dl = Ni \quad (3.3)$$

Esta lei relaciona a corrente com a intensidade do campo magnético, em que  $H$  é medido em  $Am^{-1}$ ,  $l$  é o comprimento em metros e  $N$  é o número de espiras [13].

A permeabilidade magnética é definida pelo quociente entre o valor da densidade do fluxo magnético e o valor da intensidade do campo magnético.

$$\mu = \frac{B}{H} \quad (3.4)$$

Os fenómenos magnéticos no interior de um material podem ser caracterizados pela intensidade do campo magnético  $H$  que define as correntes eléctricas, e pelo campo de indução magnética, ou densidade do fluxo magnético  $B$ , medido em  $T$  (Tesla) que provoca forças eletrodinâmicas e tensões eléctricas induzidas [16].



Na seguinte figura está ilustrada a curva do ciclo de histerese.

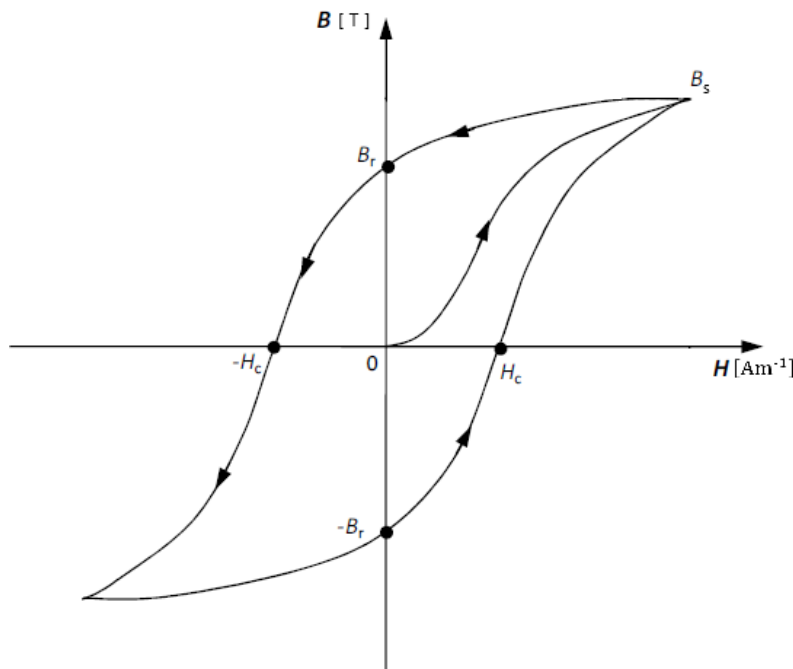


Figura 3.1: Ciclo de histerese [17]

A curva de primeira magnetização é definida a partir de um material desmagnetizado em que  $B = 0$  e  $H = 0$ . Quando se aplica campo, a relação entre  $H$  e  $B$  representa uma curva ascendente que parte da origem e sobe até ao valor de saturação  $B_s$ . Atingindo um valor máximo de  $H$ , quando se diminui o campo, os valores de  $B$  vão ser maiores que os valores obtidos da primeira magnetização. Quando o campo magnético  $H$  se anula, o material exibe uma magnetização remanescente  $B_r$ . Ao inverter o sentido do campo magnético aplicado, a indução começará a diminuir até que se anule completamente em  $H_c$ , o valor deste campo chama-se coercivo [17]. Quando  $H$  atinge um valor simétrico ao valor de saturação, este começa de novo a subir e os valores de  $B$  vão ser menores que os valores da primeira magnetização. Esta relação entre  $B$  e  $H$ , no plano  $HB$ , traça um ciclo chamado de ciclo de histerese. A área deste ciclo representa a energia perdida, cada vez que o ciclo é traçado, por unidade de volume [16].

Se em cada ponto se determinar o quociente entre o valor  $B$  e o valor de  $H$  obtêm-se para cada um dos pontos o valor da permeabilidade magnética. Na prática o que se pretende é a variação do campo magnético e assim sendo é medida a variação entre dois pontos da curva do ciclo de histerese. Daqui resulta não o valor absoluto de permeabilidade magnética mas sim o valor incremental de acordo com a seguinte equação.

$$\Delta\mu = \frac{\Delta B}{\Delta H} \quad (3.5)$$

A curva azul mostra a variação incremental da permeabilidade magnética de um núcleo que tem o ciclo de histerese representado pela linha a preto.

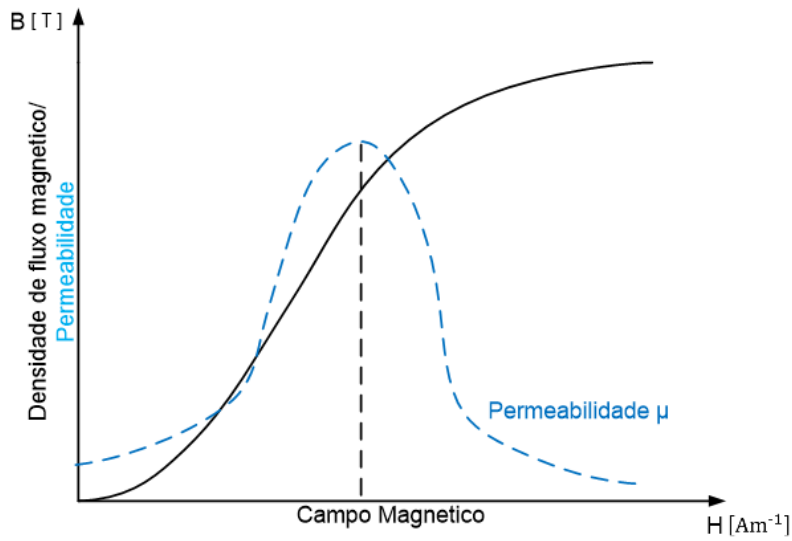


Figura 3.2: Variação incremental da permeabilidade magnética de um núcleo.

Se o ponto de funcionamento do circuito for o indicado pela linha vertical da figura 3.2, implica o máximo de permeabilidade do núcleo magnético. Nestas condições, existe um máximo de indutância e consequentemente um máximo da reatância indutiva, que conduz ao mínimo de corrente no ramo da carga. Obtêm-se maior variação da permeabilidade magnética no ponto de inflexão da curva de histerese. A intensidade do campo magnético é dada pela seguinte equação.

$$H = \frac{F}{\ell} \quad (3.6)$$

Em que a força magnetomotriz (fmm) é designada por  $Ni$  e  $\ell$  o comprimento do circuito magnético. Substituindo na equação 3.6, tem-se:

$$H = \frac{N}{\ell} \times I \quad (3.7)$$

Se se variar a corrente,  $H$  também sofre alterações, consequentemente  $B$  é igualmente modelizado, sob a curva do ciclo de histerese, e assim modeliza-se a permeabilidade magnética do material.

### 3.1.1 Ciclo de Histerese da Ferrite

As substâncias ferromagnéticas têm valores de permeabilidade relativa muito superiores a 1. Para se comparar as propriedades magnéticas dos materiais, utiliza-se a permeabilidade absoluta  $\mu$ .

$$\mu = \mu_r \mu_0 \quad (3.8)$$

Onde  $\mu_r$  é a permeabilidade relativa do material, que indica quantas vezes a permeabilidade magnética de um material é superior à constante de permeabilidade no vácuo  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ .

Na figura 3.3 apresenta-se o ciclo de histerese da ferrite, material que será utilizado nas secções 3.2.1 e 3.2.2, com a respectiva permeabilidade magnética incremental.

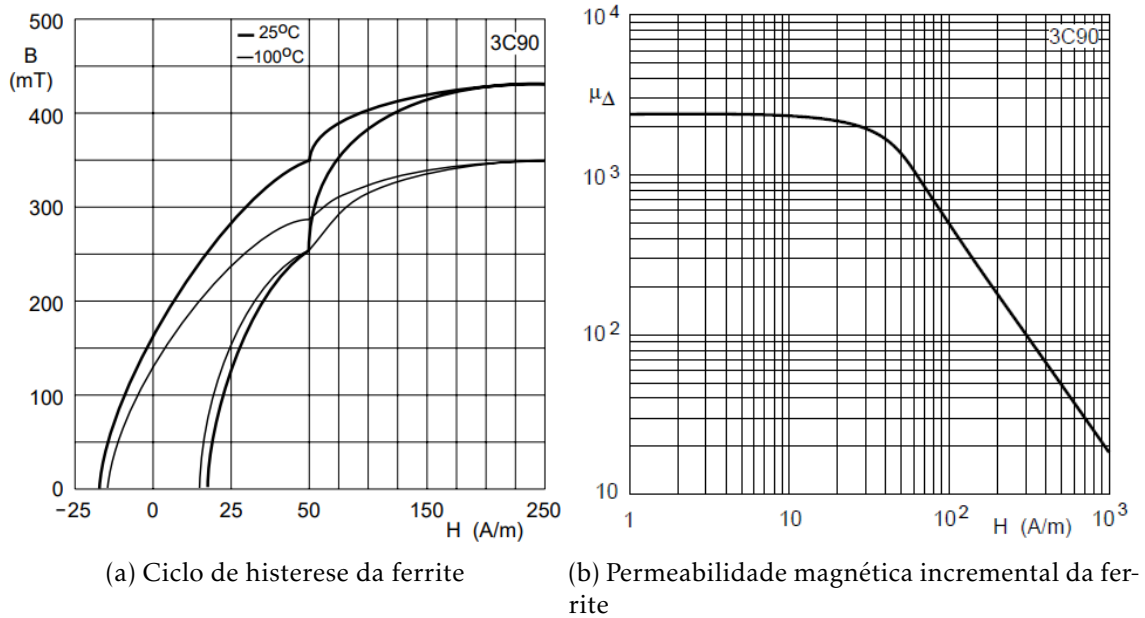


Figura 3.3: Ciclo de histerese e permeabilidade magnética incremental da ferrite [18]

Considerando a curva de histerese da ferrite para 25°C, considerou-se a zona anterior à zona de saturação, visto que quando o material entra em saturação a forma de onda é distorcida. Assumindo como limite do campo de indução magnética  $B = 400$  mT, obtém-se uma intensidade do campo magnético  $H = 90 \text{ Am}^{-1}$ .

Analisando a curva da permeabilidade magnética incremental, para  $H = 90 \text{ Am}^{-1}$ , determina-se uma permeabilidade relativa corresponde a  $\mu_r = 130$ .

### 3.1.2 Ciclo de Histerese do Ferro Laminado

O material utilizado na implementação da secção 3.2.3 é constituído por chapas com espessuras de 0,5 mm de aço GNO (grão não orientado). Na figura 3.4 está representado o ciclo de histerese deste material, considerando uma temperatura de 298K (25°C).

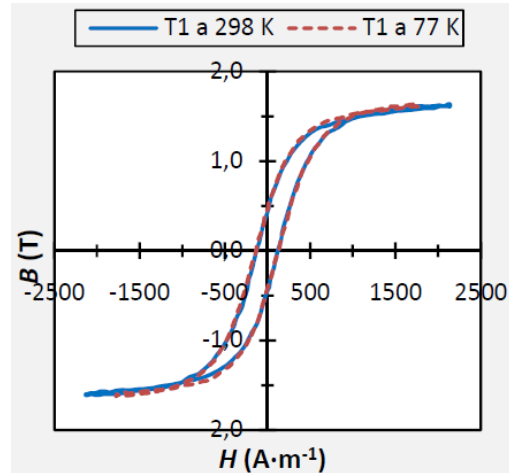
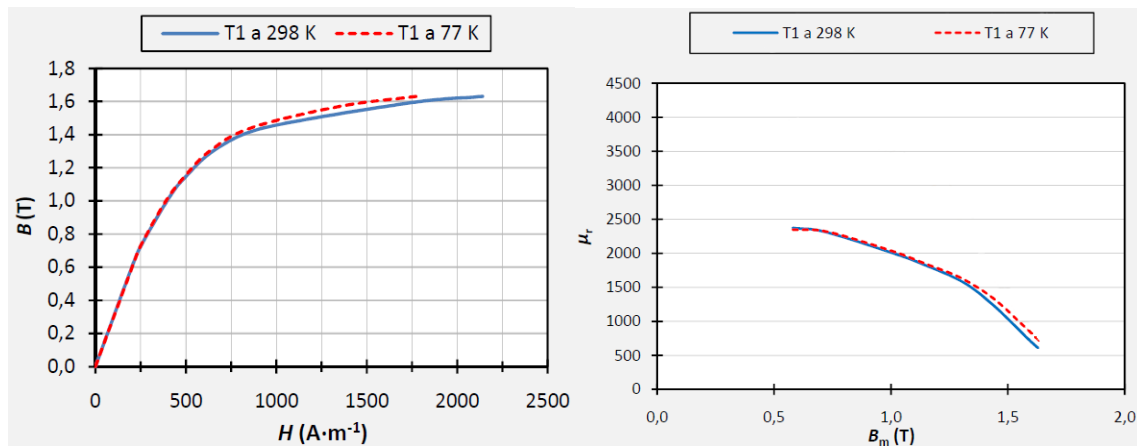


Figura 3.4: Ciclo de histerese do ferro laminado [17]

Nos gráficos da figura 3.5, está ilustrada a característica de magnetização inicial e a permeabilidade magnética relativa em função do campo de indução.



(a) Característica de magnetização inicial [17] (b) Permeabilidade magnética relativa em função do campo de indução máxima [17]

Figura 3.5: Curvas de características do ferro laminado de GNO

Pela análise da característica de magnetização inicial, considera-se uma intensidade de campo magnética de  $H = 550 \text{ A}\cdot\text{m}^{-1}$  e obtém-se um campo de indução magnética correspondente a  $B = 1,2 \text{ T}$ . Disto resulta uma permeabilidade magnética relativa correspondente a  $\mu_r = 1575$ . Conclui-se que o ferro laminado de grão não orientado apresenta uma permeabilidade relativa superior à permeabilidade relativa da ferrite  $\mu_r = 130$ .

As constituição deste material apresenta-se no anexo I.1.

### 3.1.3 Constituição

O reator de núcleo saturável é constituído por dois circuitos elétricos. Um alimentado por uma fonte de corrente contínua, que é denominado de circuito de ajuste ou controlo, e outro alimentado por uma fonte de corrente alternada intitulado de circuito de carga. Estes circuitos estão unidos por um núcleo magnético em que a coluna central tem o dobro da largura das colunas laterais. Nas seguintes figuras estão representadas as duas configurações possíveis para implementar o RNS com a linha de transmissão.

O esquema da figura 3.6 ilustra a bobina central como circuito de ajuste DC, ou seja, está conectada a uma fonte de corrente DC, e as bobinas laterais em série com a linha de transmissão.

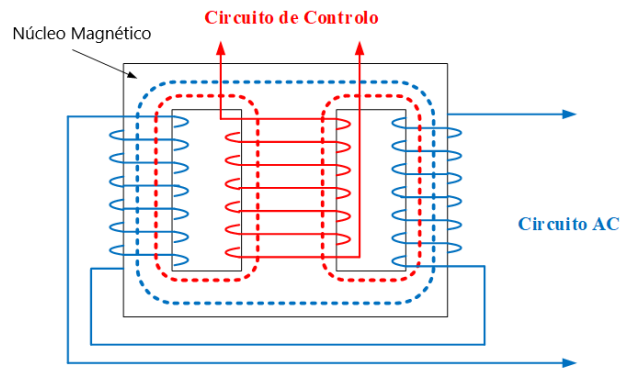


Figura 3.6: Constituição de um reator de núcleo saturável com a bobina central como circuito de ajuste DC

O esquema da figura 3.7 representa outra possível configuração do RNS, em que a bobina central está em série com a linha de transmissão e as bobinas laterais estão conectadas a uma fonte de corrente DC que ditam o circuito de controlo.

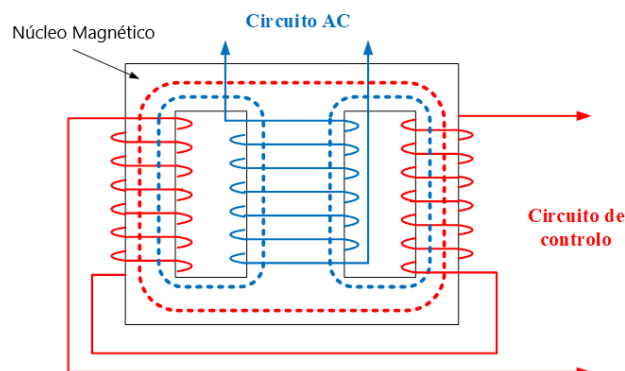


Figura 3.7: Constituição de um reator de núcleo saturável com a bobina central em série com a linha de transmissão

Na próxima secção, serão implementadas estas duas tipologias e será determinada a que melhor se adequa ao controlo do fluxo de corrente numa REE.

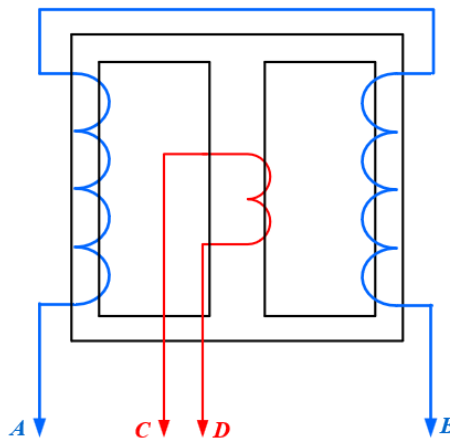
## 3.2 Tipologias Possíveis para o RNS

Nesta secção serão feitas várias implementações com diferentes configurações que explicam o procedimento efetuado para determinar o melhor caminho para controlar o fluxo de corrente no sistema. Foram implementadas com um RNS de ferrite e com um RNS magnético de ferro laminado. Para cada uma destas situações, foram testadas duas configurações possíveis, cuja constituição encontra-se detalhada na secção 3.1.3:

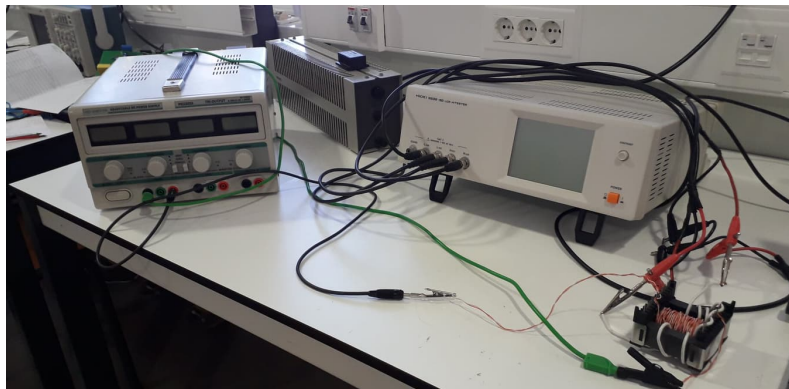
- A bobina central como circuito de ajuste DC e as bobinas laterais em série com a linha de transmissão;
- As bobinas laterais como circuito de ajuste DC e a bobina central em série com a linha de transmissão.

### 3.2.1 RNS de Ferrite com Bobinas Laterais em Série com a Linha

Nesta configuração, será feita a análise do RNS de ferrite com as bobinas laterais em série com a linha de transmissão e a bobina central como circuito de ajuste. Este reator possui 26 espiras na bobina central e 2 espiras em cada uma das bobinas laterais.



(a) Esquema



(b) Implementação

Figura 3.8: Esquema de ligações do RNS e respetiva implementação em laboratório

Para executar esta experiência, foi utilizada uma fonte de alimentação DC regulável, um reóstato que varia a resistência elétrica do circuito e um medidor de impedâncias LCR. Na figura 3.8 está ilustrada a bancada de trabalho da experiência efetuada em laboratório e o esquema de ligações do RNS. O circuito a vermelho representa o circuito de controlo, em que os pontos C e D estão ligados a uma fonte DC de tensão variável. No circuito a azul, os pontos A e B estão ligados ao medidor LCR, de forma a analisar os valores da indutância resultante.

Foi fornecida corrente contínua às bobinas laterais, com uma variação compreendida entre  $I_c \in [0; 3,15]A$  através de uma fonte de alimentação DC. Com o auxílio do medidor de impedâncias LCR foi medida a indutância, e consequentemente a reatância indutiva, e determinou-se a curva de relação da corrente com a indutância resultante, para análise do controlo do fluxo de corrente.

O reator de núcleo saturável de ferrite está ilustrado na figura 3.9, este apresenta 26 espiras na coluna central e 2 nas bobinas laterais para que a zona de saturação fosse visível. O respetivo desenho apresenta-se em anexo, na figura I.2.



Figura 3.9: RNS de ferrite

Para a simulação do circuito, considerou-se uma linha de 1km com uma reatância indutiva  $X_L = 0,37 \Omega/km$ , valor típico para uma rede de MAT, em série com as bobinas laterais do reator.

#### 3.2.1.1 Testes e Resultados

Nesta secção serão analisados os resultados da implementação anterior. De forma a representar graficamente os dados obtidos, será utilizada uma linha de tendência de potência. Uma linha de tendência de potência é uma linha curva que utiliza conjuntos de dados que comparam medidas que aumentam a uma taxa específica [19]. Foi efetuada uma linha de tendência da curva da reatância indutiva em função da corrente DC de ajuste e limitou-se a corrente entre  $I_c \in [200 ; 800] mA$ , visto que corresponde à zona anterior à zona de saturação.

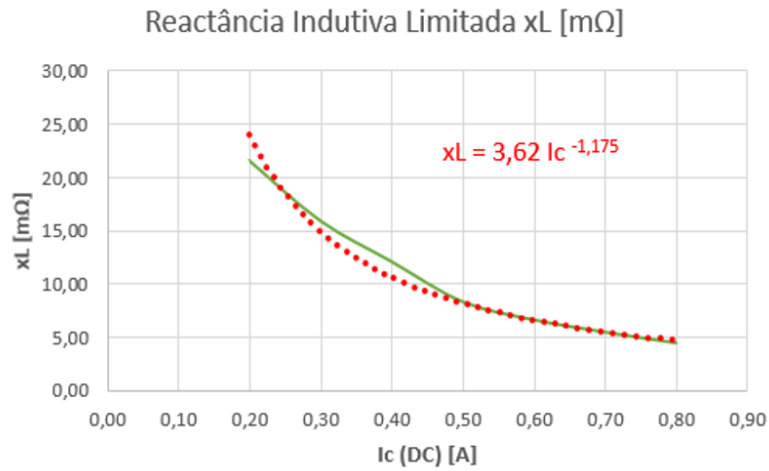


Figura 3.10: Valores da reatância do RNS

É então possível determinar o intervalo da reatância indutiva que pode ser ajustado. Pela análise do gráfico, verifica-se que o intervalo de variação da reatância está compreendido entre  $X_L \in [5 ; 22]$  mΩ. Tendo em consideração uma linha de 1 km com uma reatância indutiva  $X_L = 370$  mΩ, é de salientar que a reatância pode ser ajustada de  $X_L \in [375 ; 392]$  mΩ.

Consequentemente foi determinada a indutância em função da corrente contínua de ajuste, ilustrada na figura 3.11.

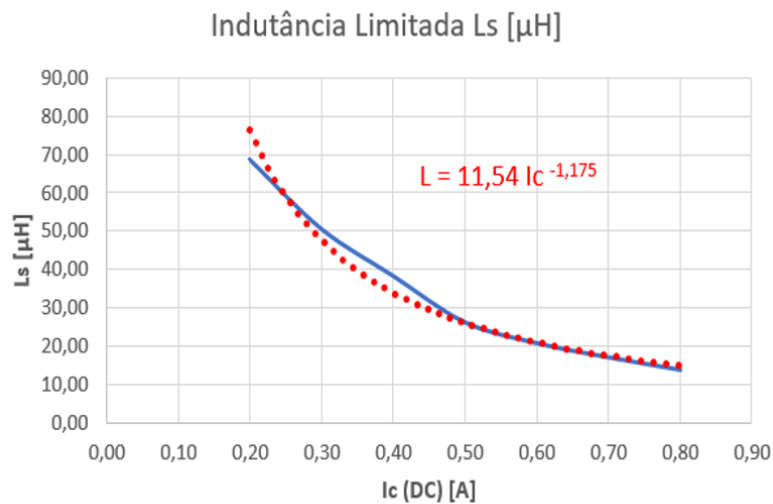


Figura 3.11: Valores da indutância do RNS

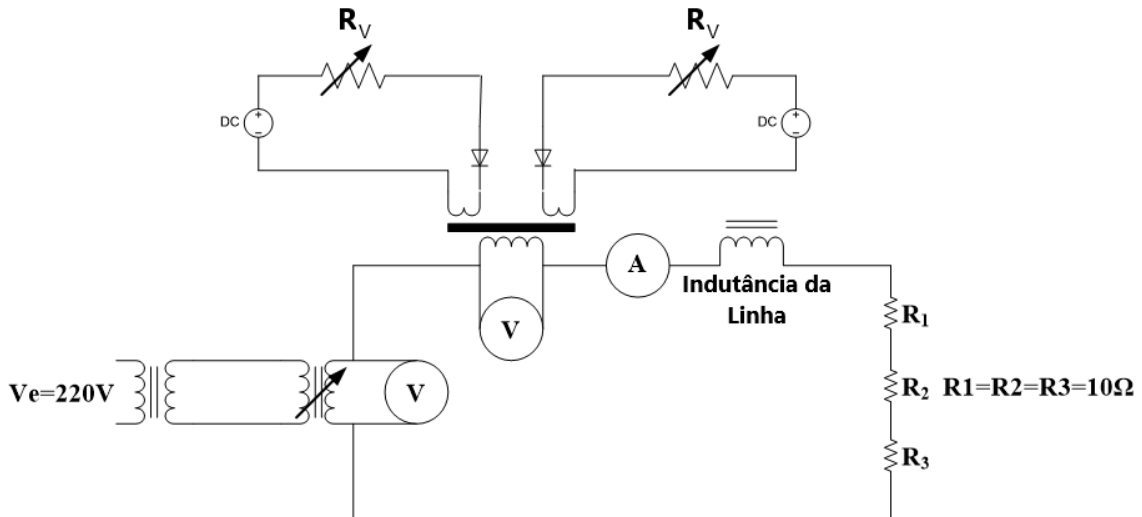
Pela análise do gráfico, é possível concluir que para  $I_c \in [200 ; 800]$  mA, a indutância está compreendida entre  $L \in [15 ; 75]$  μH. A expressão da indutância em função da corrente de ajuste apresenta-se na seguinte equação:

$$L = 11,54 I_c^{-1,175} \quad (3.9)$$

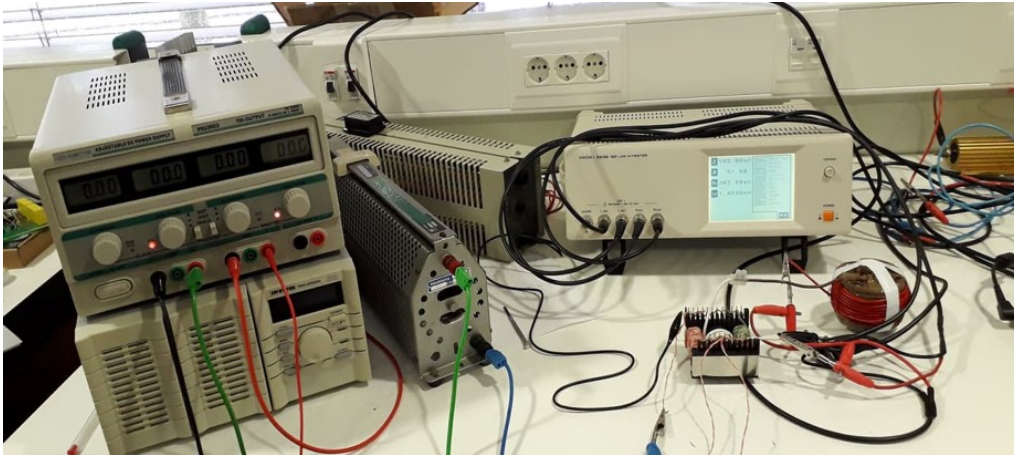


### 3.2.2 RNS de Ferrite com Bobina Central em Série com a Linha

Foi efetuada a experiência ilustrada na figura 3.12, onde se analisou o comportamento do reator de núcleo saturável com 12 espiras na bobina central e 19 espiras nos enrolamentos laterais. Na configuração desta experiência, a linha de transmissão vai estar em série com a bobina central do reator. A determinação do número de espiras em cada um dos enrolamentos foi acertado de forma a que a zona de saturação do núcleo fosse visível.



(a) Esquema



(b) Implementação

Figura 3.12: Esquema e respetiva implementação do RNS

A bobina central está em série com a reatância da linha e foram utilizadas duas fontes de alimentação DC regulável, de forma a fornecer corrente a cada uma das bobinas laterais. Utilizou-se um medidor LCR para analisar a impedância, resistência e desfasagem do reator, dois reóstatos em série com cada um dos enrolamentos laterais que variam a resistência elétrica entre  $R_V \in [15; 20]\Omega$  e um dispositivo que simula a reatância indutiva da linha. O esquema da figura 3.12 demonstra o reator de núcleo saturável ligado à rede que procede à simulação do controlo de fluxo de corrente.

O reator de núcleo saturável de ferrite com 12 espiras na bobina central e 19 espiras nas bobinas laterais está ilustrado na figura 3.13. O respetivo desenho apresenta-se em anexo, na figura I.2.

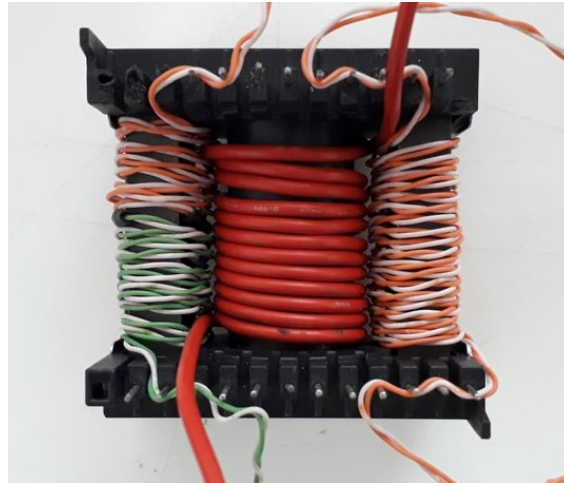


Figura 3.13: Reator de núcleo saturável

Para o estudo do comportamento do reator, a corrente DC fornecida à bobina lateral direita foi aumentada gradualmente, enquanto se fixou outra corrente DC na bobina lateral esquerda. As especificações da linha estão referidas na tabela 3.1, resultando numa reatância indutiva  $X_L=0,39 \text{ m}\Omega$  que vai ser somada ao intervalo suportado pelo reator de núcleo saturado.



Figura 3.14: Reatância indutiva da linha

Tabela 3.1: Especificações da reatância indutiva da linha

<b>L[mH]</b>	1,24
<b>R[mΩ]</b>	337,62
$\phi[^\circ]$	49,36
<b>Z[mΩ]</b>	504,6

A indutância da linha está em série com o núcleo central, e as bobinas laterais estão ligadas a uma fonte de alimentação DC regulável que se responsabiliza pelo controlo do circuito. Foi utilizada uma carga de  $R = 30\Omega$  e dois díodos que transformam corrente alternada em corrente contínua, para evitar que a fonte de alimentação DC receba interferência de corrente AC. Os resultados obtidos encontram-se na secção 3.2.2.1

## 3.2.2.1 Testes e Resultados

Como já foi referido na secção 3.2.2, nesta configuração a linha de transmissão está em série com a bobina central do reator e as bobinas laterais vão funcionar como circuito de ajuste DC. Como tal, de forma a obter uma maior variação de indutância, com uma fonte DC, fixou-se uma certa corrente na bobina lateral esquerda, e com outra fonte DC, aumentou-se gradualmente a corrente na bobina lateral direita, entre  $I_c \in [0; 2]A$ . As duas bobinas laterais possuem o mesmo número de espiras, como tal, comportam-se de igual maneira. Este processo repetiu-se sucessivamente, obtendo-se a evolução das curvas da reatância indutiva, para diferentes valores de corrente contínua. Estas curvas foram aproximadas através de linhas de tendência de potência, de forma a determinar as equações ilustradas no gráfico da figura 3.15.

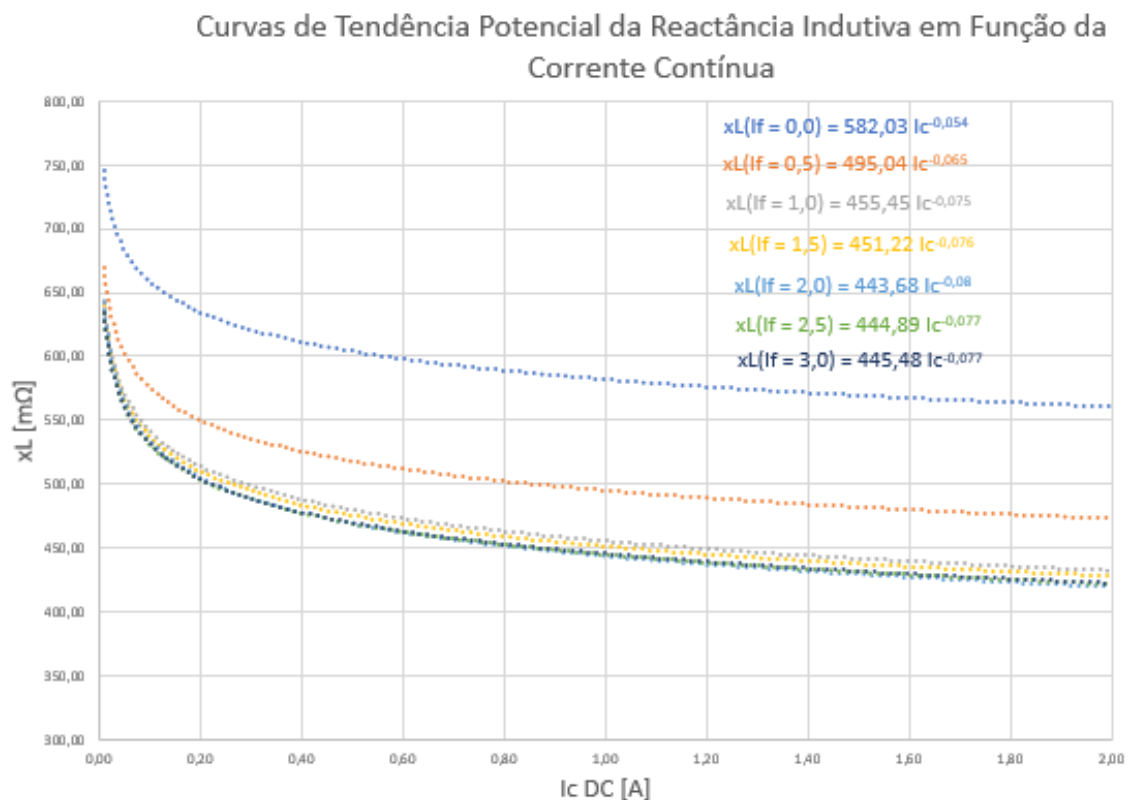


Figura 3.15: Curvas da reatância indutiva para diferentes valores de corrente

Analisando o gráfico, verifica-se que o intervalo onde a reatância indutiva pode variar está compreendido entre  $X_L \in [420; 750]$  mΩ para uma corrente de ajuste compreendida entre  $I_c \in [0; 2]A$ . Neste intervalo de valores já está incluído o valor da reatância indutiva da linha,  $X_L = 0,39$  mΩ.

De forma a analisar a variação da indutância, para que seja possível comparar esta configuração com as restantes tipologias, determinou-se a evolução da indutância em função da corrente de ajuste, ilustrada no gráfico da figura 3.16.

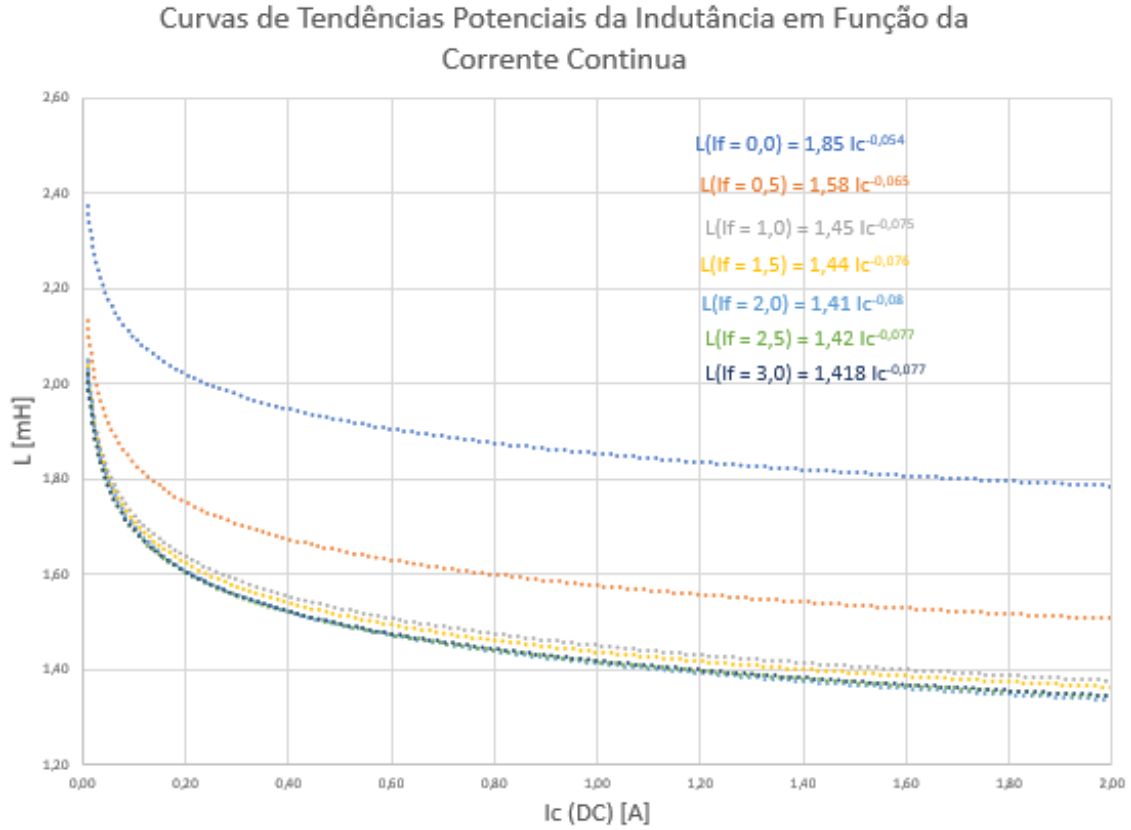


Figura 3.16: Curvas da indutância para diferentes valores de corrente

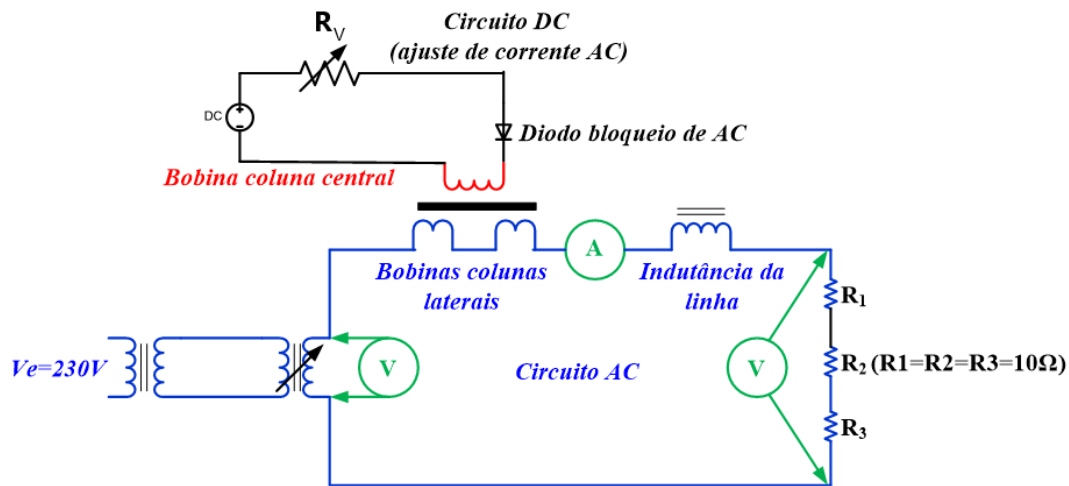
Pela análise do gráfico, é possível concluir que para uma corrente  $I_c \in [0; 2]A$ , a variação da indutância está compreendida entre  $L \in [1,30; 2,40]$  mH, tendo-se obtido as seguintes curvas para diferentes valores de corrente.

$$\begin{aligned}
 L(I_f = 0,0) &= 1,85 I_c^{-0,054} \\
 L(I_f = 0,5) &= 1,58 I_c^{-0,065} \\
 L(I_f = 1,0) &= 1,45 I_c^{-0,075} \\
 L(I_f = 1,5) &= 1,44 I_c^{-0,075} \\
 L(I_f = 2,0) &= 1,41 I_c^{-0,080} \\
 L(I_f = 2,5) &= 1,42 I_c^{-0,077} \\
 L(I_f = 3,0) &= 1,418 I_c^{-0,077}
 \end{aligned} \tag{3.10}$$

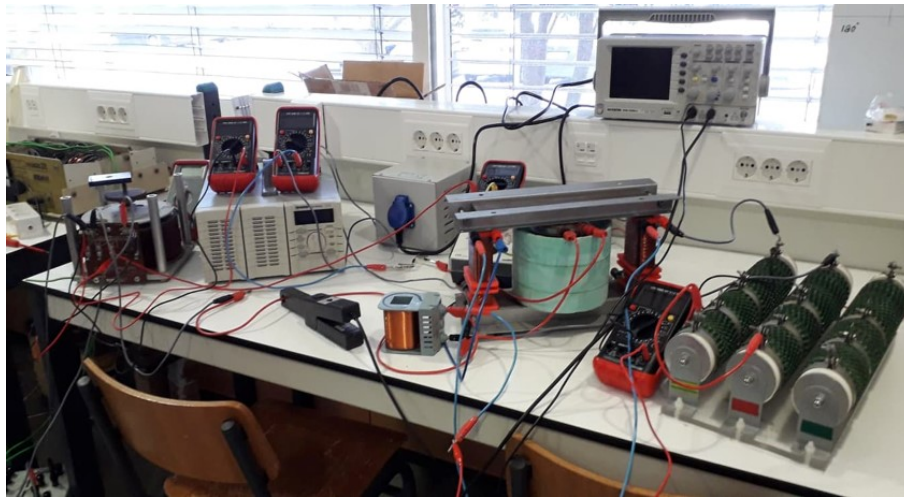
Foi replicado o circuito da figura 3.12 no laboratório e chegou-se à conclusão que a variação da indutância para esta configuração não é suficiente para influenciar o fluxo de corrente na rede. Como tal, testou-se a implementação ilustrada na secção 3.2.3 que trata de um reator de núcleo magnético de ferro laminado em que as bobinas laterais vão estar em série com a linha de transmissão.

### 3.2.3 RNS de Ferro Laminado com Bobina Central de Ajuste

Esta experiência baseia-se na análise de um reator de núcleo magnético de ferro laminado que partilha do mesmo princípio de funcionamento que o RNS de ferrite. Nesta configuração, as bobinas laterais estão ligadas em série com a reatância da linha e a bobina central está conectada a uma fonte de alimentação DC regulável que controla o circuito. A figura 3.17 ilustra o modelo físico da linha ligado à rede com ajuste do fluxo de corrente através de reactância saturável e a bancada de trabalho do teste formalizado.



(a) Esquema



(b) Implementação

Figura 3.17: Esquema e implementação do RNS

O circuito monofásico está ligado à rede através de um transformador de isolamento e um autotransformador, que por sua vez estão ligados às bobinas laterais do reator. Estas estão em série com a linha de transmissão.

A bobina central está a ser alimentada por uma fonte de alimentação DC regulável, com a interposição de um diodo que transforma corrente alternada em corrente contínua, para evitar que a fonte de alimentação DC receba interferência de corrente AC.



A bobina que simula a linha de transmissão possui uma indutância de  $L = 2 \text{ mH}$  com uma resistência interna correspondente a  $R = 0,8\Omega$ , como ilustra a tabela 3.2. Como se considerou uma carga indutiva com  $R = 30\Omega$ , criou-se um circuito RL que origina uma carga resistiva com  $R = 30,8\Omega$ . A bobina que simula a linha de transmissão está demonstrada na figura 3.18.

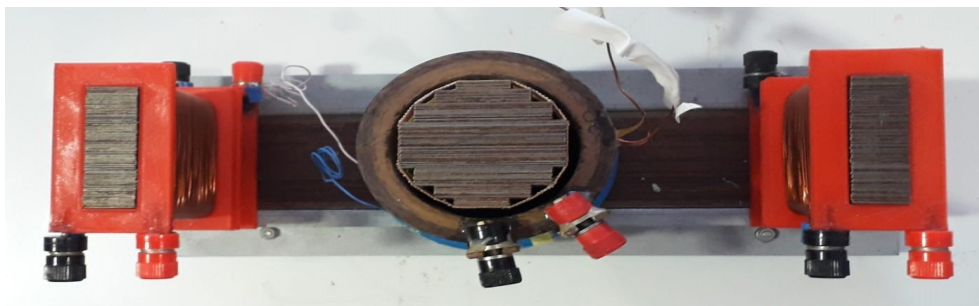


Tabela 3.2: Especificações da linha de transmissão

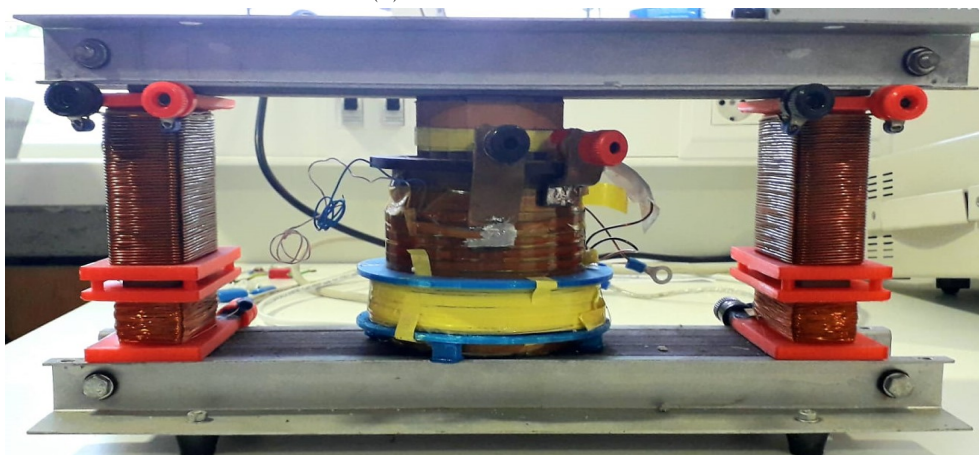
L [mH]	2,00
R [mΩ]	0,80

Figura 3.18: Linha de transmissão

Este dispositivo tem duas bobinas laterais que nesta configuração vão ficar em série com a reatância da linha. A bobina central vai ser alimentada por corrente contínua proveniente de uma fonte de alimentação DC regulável. O reator de núcleo magnético em ferro laminado está demonstrado na figura 3.19 e o respetivo desenho está ilustrado em anexo, na figura I.3.



(a) RNS visto de cima



(b) RNS visto de frente

Figura 3.19: Dispositivo estudado

### 3.2.3.1 Testes e Resultados

A corrente que flui ao longo do esquema da figura 3.17 em função da corrente de ajuste do RNS está representada no gráfico da figura 3.20.

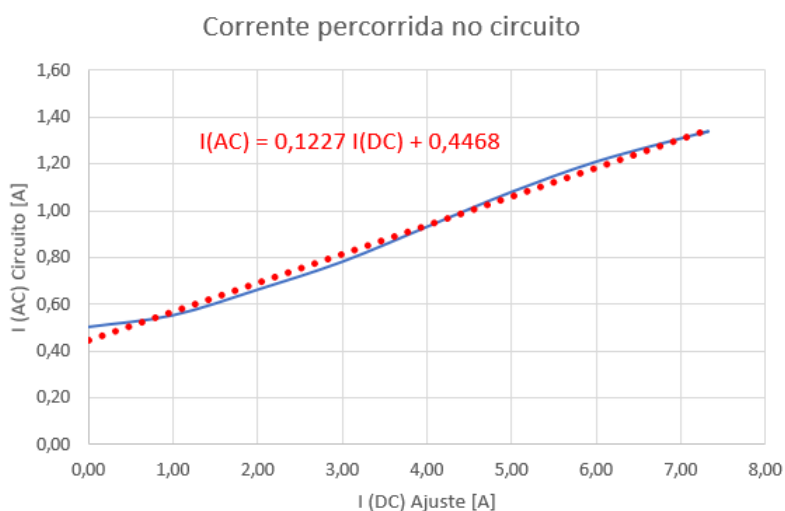


Figura 3.20: Corrente percorrida no circuito

Quanto maior a corrente de ajuste, maior a variação de corrente percorrida pela linha. Com base no gráfico da figura 3.20 é possível concluir que o fluxo de corrente é controlável ao longo do circuito. De forma a analisar o comportamento do núcleo magnético em ferro laminado, isolado da rede de ensaio, determinaram-se as suas características em função da corrente contínua de ajuste, na experiência laboratorial ilustrada na figura 3.21.

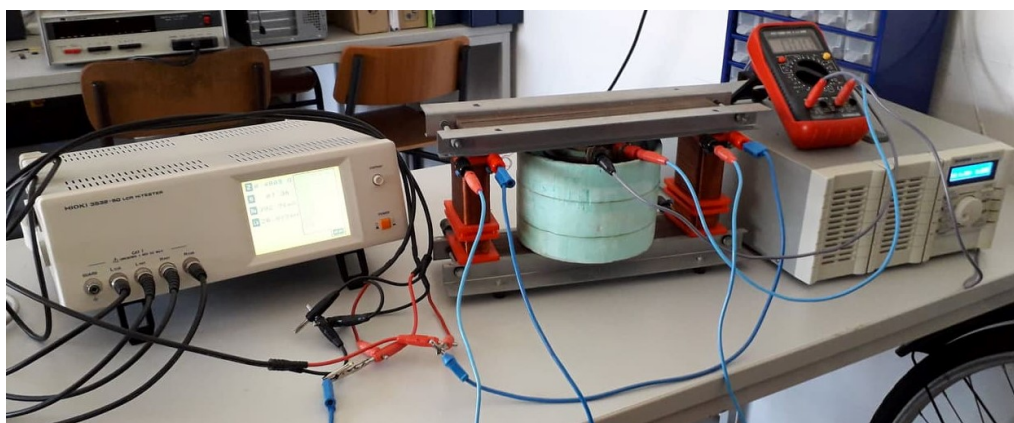


Figura 3.21: Ensaio experimental do reator de núcleo magnético

Para a concretização deste ensaio, utilizou-se um medidor de impedâncias LCR e uma fonte de corrente contínua e determinaram-se os valores da impedância, do desfasamento entre a tensão e corrente, da resistência e da indutância do RNS em função da corrente contínua, ilustrados na tabela 3.3.

Tabela 3.3: Características do reator de núcleo magnético

$I_a(DC)[A]$	$Z [\Omega]$	$\phi[^\circ]$	$R_s [\Omega]$	$L [mH]$
1,00	10,50	84,00	1,00	34,50
2,00	10,00	78,80	1,80	27,20
3,00	7,70	81,50	1,20	23,80
4,00	7,00	81,00	1,10	21,30
5,00	5,60	78,00	1,10	16,60
6,00	4,30	77,70	0,70	13,70
7,00	4,50	76,60	0,86	11,20
8,00	3,00	73,20	0,82	9,10
9,00	2,60	72,50	0,74	7,80
10,00	2,50	74,40	0,68	7,80

De forma a caracterizar o reator de núcleo magnético de ferro laminado, para ser incorporado numa rede de energia elétrica, determinou-se a razão entre a indutância em função da corrente contínua de ajuste e utilizou-se uma linha de tendência exponencial para calcular a curva que servirá de controlo para a rede de energia elétrica.

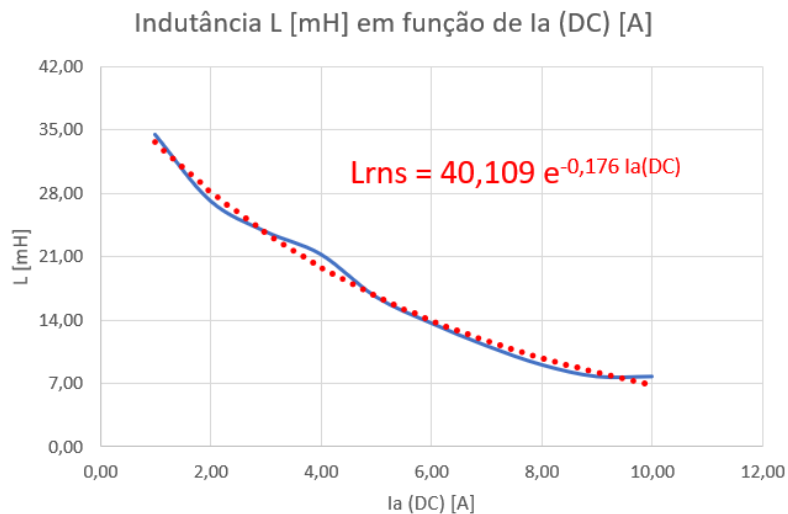


Figura 3.22: Gráfico resultante da indutância do núcleo magnético de ferro laminado

Pela análise do gráfico da figura 3.22, constata-se que para uma corrente  $I_a \in [1; 10] A$ , resulta uma variação de indutância compreendida entre  $L \in [7, 80; 34, 50] mH$ .

$$L_{RNS} = 40,109e^{-0,176I_a(DC)} \quad (3.11)$$

A experiência efetuada em laboratório, ilustrada no circuito da figura 3.17, concluiu que efetivamente o reator de núcleo magnético em ferro laminado controla o fluxo de corrente na rede, enquanto que o reator de núcleo saturável em ferrite não proporciona



variação de indutância suficiente para esse efeito. Este facto deve-se à diferença do valor de saturação da permeabilidade magnética de cada um dos materiais.

### 3.3 Conclusão

De todas as configurações implementadas, concluiu-se que efetivamente o reator de núcleo magnético de ferro laminado controla o fluxo de corrente na rede construída em laboratório.

A primeira experiência efetuada com o RNS de ferrite, onde se configurou as bobinas laterais em série com a linha de transmissão, determinou-se que o intervalo de variação da indutância é demasiado curto para controlo do fluxo de corrente, dado que para uma corrente compreendida entre  $I_c \in [200; 800]$  mA, resulta numa variação de indutância de  $L \in [15; 75] \mu H$ .

A segunda experiência realizada com o RNS de ferrite, com a bobina central em série com a linha de transmissão, determinou-se que esta configuração não proporciona variação da indutância suficiente para controlar o fluxo de corrente na rede, demonstrando que para  $I_c \in [0; 2]$  A, resulta numa indutância  $L \in [1, 20; 2, 40]$  mH.

Na terceira e última experiência foi utilizado o RNS de ferro laminado com as bobinas laterais em série com a linha de transmissão. Concluiu-se que efetivamente, para esta configuração, o reator de núcleo magnético em ferro laminado controla o fluxo de corrente na rede, para uma corrente compreendida entre  $I_a \in [1; 10]$  A, resulta numa variação da indutância de  $L \in [7, 80; 34, 50]$  mH. O ferro laminado possui uma permeabilidade magnética superior à permeabilidade magnética da ferrite.

A permeabilidade relativa da ferrite é de  $\mu_{r_{ferrite}} = 130$ , e a permeabilidade relativa do ferro laminado é de  $\mu_{r_{ferrolaminado}} = 1575$ .

Não foi possível concretizar uma quarta experiência cuja tipologia consiste na utilização do RNS de ferro laminado, com a bobina central em série com a linha de transmissão. Para tal, era necessário duas fontes de alimentação DC com capacidade de corrente até 80 A.

No capítulo 4, o dispositivo estudado será integrado numa rede de energia elétrica e serão feitas simulações que comprovem o seu funcionamento e será analisado o respetivo fluxo de energia.



## CONTROLO E APLICAÇÃO DO RNS

Será desenvolvido um sistema de controlo com o objetivo de controlar o fluxo de energia na rede em estudo com a introdução do RNS. O SEE é posteriormente simulado com o auxílio do *Simulink*, e por fim, simulado com o auxílio do HyperSIM, numa técnica *open loop*, no laboratório Nester.

## 4.1 Trânsito de Energia

Nesta secção é apresentada a formulação do trânsito de energia como forma de avaliação do impacto que o RNS pode ter quando integrado numa dada rede de energia elétrica.

### 4.1.1 Formulação Nodal

O trânsito de energia é a solução em regime estacionário que formula um modelo matemático que descreve o sistema de energia elétrica. As equações nodais em forma matricial são dadas pela seguinte expressão:

$$[I] = [Y][U] \quad (4.1)$$

Em que  $[I]$  é o vetor associado à corrente injetada num dado barramento, sendo  $I_i$  representado pela amplitude complexa de corrente injetada no nó  $i$ .  $[Y]$  é a matriz das admitâncias nodais e  $[U]$  é o vetor das tensões nodais. A corrente injetada relaciona a potência e tensão nodal pela seguinte equação:

$$I = \frac{S^*}{U^*} = \frac{P - jQ}{U^*} \quad (4.2)$$

Em que  $S_i$  representa a potência complexa injetada no nó  $i$  e  $y_{ij}$  corresponde ao elemento da matriz de admitâncias nodais (linha  $i$ , coluna  $j$ ), sendo  $U_i$  representado pela amplitude complexa de tensão no nó  $i$ .

Sob forma matricial, resulta:

$$\begin{bmatrix} \frac{S_1^*}{U_1^*} \\ \frac{S_2^*}{U_2^*} \\ \frac{S_3^*}{U_3^*} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & y_{13} \\ y_{21} & y_{22} & y_{23} \\ y_{31} & y_{32} & y_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

Que conduz às seguintes equações nodais:

$$\begin{aligned} \frac{S_1^*}{U_1^*} &= y_{11}U_1 + y_{12}U_2 + y_{13}U_3 \\ \frac{S_2^*}{U_2^*} &= y_{21}U_1 + y_{22}U_2 + y_{23}U_3 \\ \frac{S_3^*}{U_3^*} &= y_{31}U_1 + y_{32}U_2 + y_{33}U_3 \end{aligned}$$

A matriz das admitâncias nodais é simétrica e complexa e pode-se decompor em parte real e imaginária:

$$[Y] = [G] + j[B] \quad (4.4)$$

Onde  $G$  representa a matriz associada à condutância e  $B$  é a matriz associada à susceptância nodal.

A solução do trânsito de energia é determinada pelo cálculo das tensões nos respectivos barramentos que será efetuada através do método iterativo *Gauss-Seidel*. Este método repete-se por iterações sucessivas até que as amplitudes das tensões em cada um dos barramentos entre duas iterações sucessivas seja inferior a uma certa tolerância (tipicamente  $\epsilon = 10^{-4} pu$ ) [2].

De forma a analisar o fluxo de potência na rede, é necessário calcular a potência transitada entre dois barramentos (i, j) que se calcula através da seguinte expressão:

$$P_{ij} = \frac{U_i U_j}{X_{ij}} \sin(\theta_i - \theta_j) \quad (4.5)$$

O valor por unidade (p.u.) de uma grandeza é adimensional e obtém-se pelo quociente entre o valor da grandeza, que expressa qualquer unidade do SI, e o valor base que num sistema trifásico considera as seguintes equações:

Base da impedância [ $\Omega$ ]

$$|Z_{base}| = \frac{|U_{base}|^2}{|S_{base}|} \quad (4.6)$$

Base da corrente [A]

$$|I_{base}| = \frac{|S_{base}|}{\sqrt{3}|U_{base}|} \quad (4.7)$$

Base da potência [MVA]

$$|S_{base}| = \sqrt{3}|U_{base}||I_{base}| \quad (4.8)$$

De seguida, será apresentada a rede que irá incorporar o RNS e analisado o respetivo trânsito de energia de forma analítica.

O dimensionamento da rede elétrica que servirá de suporte para as simulações com o RNS apresenta-se na figura 4.1, bem como o esquema unifilar e o respetivo esquema monofásico equivalente. Esta rede possui uma tensão nominal de 60 kV, pelo que se classifica como AT.

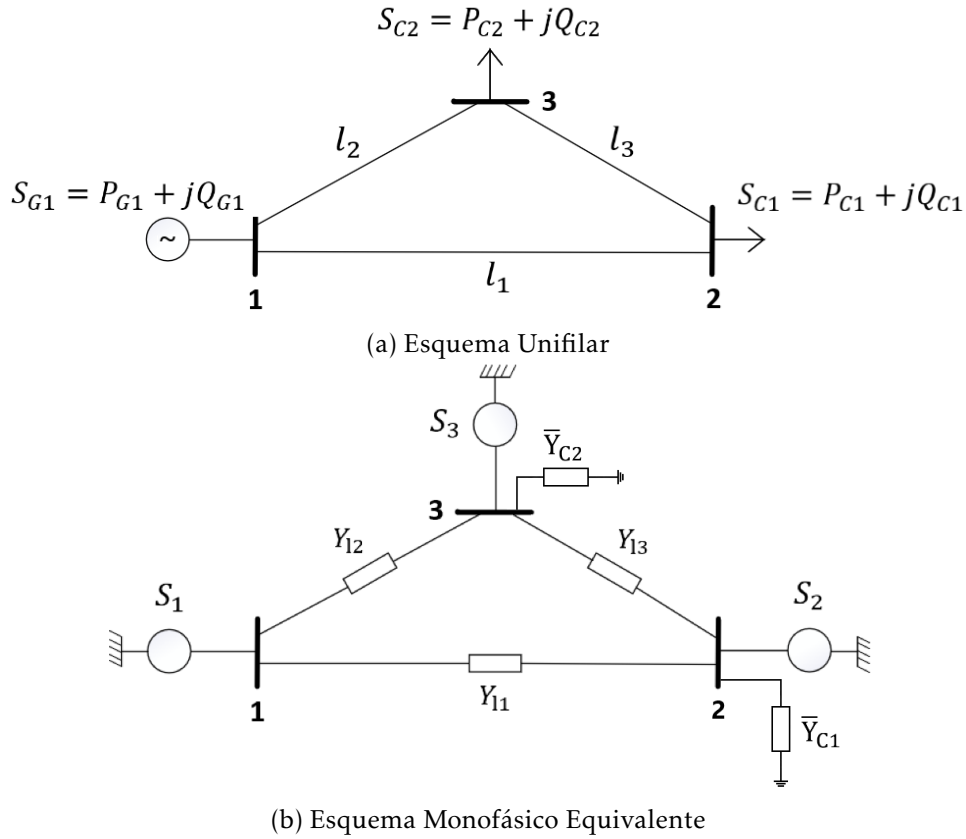


Figura 4.1: Sistema em estudo com 3 barramentos

A rede contém uma geração, três linhas e duas cargas de carácter indutivo. Para cada uma das linhas de transmissão utilizou-se uma reatância e resistência por unidade de comprimento correspondente a  $X_L = 0,3 \, \Omega/\text{km}$  e  $R = 0,1 \, \Omega/\text{km}$ , respetivamente. Os valores das características das linhas são valores típicos para linhas de AT. Os valores por unidade de grandeza, são calculados com a impedância base, demonstrada na equação 4.6.

Tabela 4.1: Dados de dimensionamento das linhas

	Comprimento [km]	R[ $\Omega$ ]	X[ $\Omega$ ]	R[pu]	X[pu]
Linha 1	30	3,0	9,0	0,0833	0,2500
Linha 2	10	1,0	3,0	0,0270	0,0833
Linha 3	25	2,5	7,5	0,0694	0,2083

As cargas apresentam elasticidade 2 ( $\epsilon_u = 2$ ) visto que são modeladas por uma impedância constante, sendo as potências especificadas para a tensão nominal. Como possuem

elasticidade 2, não serão consideradas na potência injetada dos respectivos barramentos. A admitância equivalente, em p.u., calcula-se da seguinte forma:

$$Y_C = \frac{S_C^*}{|U|^2} \quad (4.9)$$

A corrente injetada no respetivo barramento é nula e a admitância  $Y_C$  considera-se na matriz das admitâncias nodais. Como as cargas são de elasticidade 2, a potência consumida varia com o quadrado da tensão.

Tabela 4.2: Dados de dimensionamento das cargas

	P[MW]	Q[MVAr]	P[pu]	Q[pu]
Carga 1	30,00	12,75	0,30	0,1275
Carga 2	15,00	9,00	0,15	0,09

Recorrendo à equação 4.9, as admitâncias  $Y_{C1}$  e  $Y_{C2}$  são obtidas:

$$Y_{C1} = \frac{S_{C1}^*}{|U|^2} = 0,3 - j0,1275pu$$

$$Y_{C2} = \frac{S_{C2}^*}{|U|^2} = 0,15 - j0,09pu$$

As potências complexas injetadas são determinadas pela diferença entre a potência gerada e consumida em cada um dos barramentos.

$$\begin{aligned} S_1 &= S_{G1} - S_{C1} = P_{G1} + jQ_{G1} \\ S_2 &= S_{G2} - S_{C1} = 0 \\ S_3 &= S_{G3} - S_{C2} = 0 \end{aligned} \quad (4.10)$$

Fazendo uma análise a partir do esquema monofásico da figura 4.1 obtém-se a seguinte formulação nodal na forma matricial:

$$\begin{bmatrix} \frac{P_{G1} - jQ_{G1}}{U_1^*} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{L1} + y_{L2} & -y_{L1} & -y_{L2} \\ -y_{L1} & y_{L1} + y_{L3} + y_{C1} & -y_{L3} \\ -y_{L2} & -y_{L3} & y_{L2} + y_{L3} + y_{C2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

Substituindo pelos valores da rede, calcula-se:

$$\begin{bmatrix} \frac{P_{G1} - jQ_{G1}}{U_1^*} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4,72 - j14,46 & -1,20 + j3,60 & -3,52 + j10,86 \\ -1,20 + j3,60 & 2,94 - j8,05 & -1,44 + j4,32 \\ -3,52 + j10,86 & -1,44 + j4,32 & 5,11 - j15,27 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1,00 \\ U_2 \\ U_3 \end{bmatrix}$$

Resolvendo o seguinte sistema de equações:

$$\begin{cases} \frac{S_{G1}}{U_1^*} = y_{11}U_1 + y_{12}U_2 + y_{13}U_3 \\ U_2 = -\frac{y_{21}}{y_{22}}U_1 - \frac{y_{23}}{y_{22}}U_3 \\ U_3 = -\frac{y_{31}}{y_{33}}U_1 - \frac{y_{32}}{y_{33}}U_2 \end{cases} \quad (4.12)$$

Donde resultam, por solução da equação 4.12:

$$S_{G1} = 0,4298 + j0,2238pu$$

$$U_2 = 0,964e^{-j2,18^\circ}pu$$

$$U_3 = 0,982e^{-j1,02^\circ}pu$$

A referência dos ângulos foi colocada em  $U_1$ . O ângulo da tensão no barramento 2 e 3 deu negativo, o que significa que a potência ativa transita de B1 para B2 e de B1 para B3 para alimentar as cargas a partir da rede.

A tabela 4.3 foi obtida considerando  $|S_{base}| = 100$  MVA.

Tabela 4.3: Dados de dimensionamento da geração

	P[MW]	Q[MVAr]	P[pu]	Q[pu]
Geração	42,98	22,38	0,4298	0,2238

A carga efetivamente consumida em cada um dos barramentos é calculada da seguinte forma:

$$S_{D2} = |U_2|^2 Y_{C1}^* = 27,88 + j11,85[\text{MW/MVAr}]$$

$$S_{D3} = |U_3|^2 Y_{C2}^* = 14,46 + j8,68[\text{MW/MVAr}]$$

De seguida a rede foi testada com o auxílio do PSS/E a fim de validar os resultados obtidos nesta secção.



### 4.1.2 Simulação PSS/E

O sistema foi simulado com o auxílio do PSS/E, de forma a validar os valores obtidos na secção 4.1.1, para o mesmo valor de potência de cargas 4.2, como de reatância e resistência das linhas 4.1. Recorrendo ao método iterativo Gauss-Seidel, determinou-se a solução do trânsito de energia da rede.

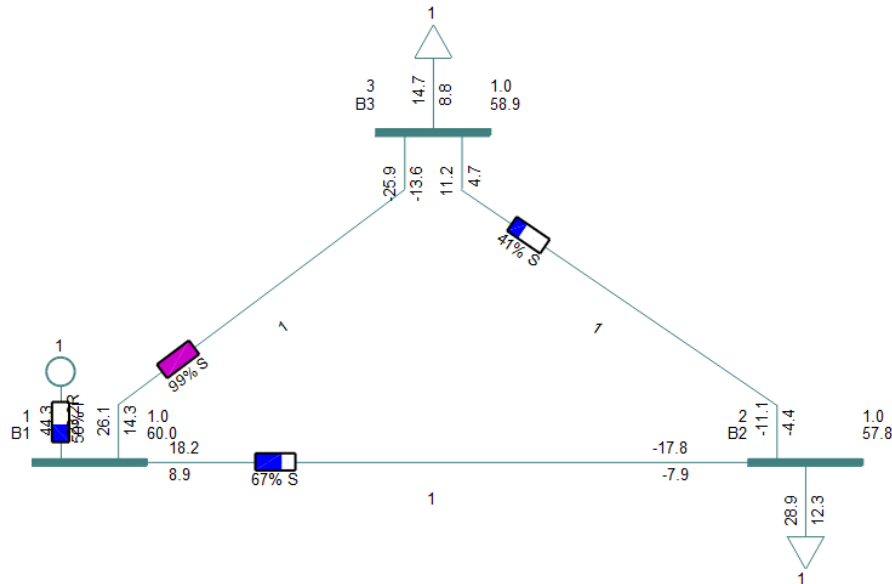


Figura 4.2: Rede em estudo simulada no PSS/E

Nesta simulação, considerou-se que cada uma das linhas possui uma potência nominal de  $|S| = 30$  MVA, ou seja, o limite máximo de potência aparente para cada uma das linhas corresponde a  $S = 30$  MVA. Os resultados obtidos da análise do trânsito de energia no PSS/E estão representados na tabela 4.4.

Tabela 4.4: Valores trifásicos

Trifásico							
Geração				Carga 1		Carga 2	
S [MVA]	P [MW]	Q [MVAr]	U [kV]	P [MW]	Q [MVAr]	P [MW]	Q [MVAr]
50,63	45,00	23,20	60,00	30,00	12,75	15,00	9,00
				$ U_1  [pu]$	0,986	$ U_2  [pu]$	0,992

Pela análise da tabela, é possível constatar que a tensão em cada um dos barramentos cumpre os parâmetros de segurança e qualidade  $U \in [0,95; 1,05] pu$ .

Esta simulação foi feita com o propósito de transcrever os valores do sistema trifásico, para um sistema monofásico que será integrado no *Simulink* onde a rede será simulada com a integração do RNS.

Os valores obtidos do sistema trifásico do PSS/E são valores compostos, pelo que é necessário que as tensões sejam transcritas para valores simples, pela equação 4.14 e as potências sejam convertidas para monofásicas, através da equação 4.16, para serem usados no *Simulink*.

$$U_{\text{pico}} = \frac{U_{\text{composto}} \times \sqrt{2}}{\sqrt{3}} \quad (4.13)$$

$$U_{\text{simples}} = \frac{U_{\text{composto}}}{\sqrt{3}} \quad (4.14)$$

$$S_{\text{trifásico}} = \sqrt{3} U_{\text{composto}} \times I \quad (4.15)$$

$$S_{\text{monofásico}} = \frac{U_{\text{composto}}}{\sqrt{3}} \times I \quad (4.16)$$

Na tabela 4.5 estão ilustrados os valores monofásicos resultantes da simulação do PSS/E.

Tabela 4.5: Valores monofásicos

Monofásico					
Geração		Carga 1		Carga 2	
S [MVA]	U [kV]	P [MW]	Q [MVar]	P [MW]	Q [MVar]
16,88	34,64	10,00	4,25	5,00	3,00
		$ U_1 [\text{pu}]$	0,980	$ U_2 [\text{pu}]$	0,981

Na figura 4.3 está ilustrado o esquema da rede com o reator de núcleo saturável em ferro laminado (3.11) aplicado numa só fase da segunda linha. Estes valores servirão de base para as simulações nas próximas secções.

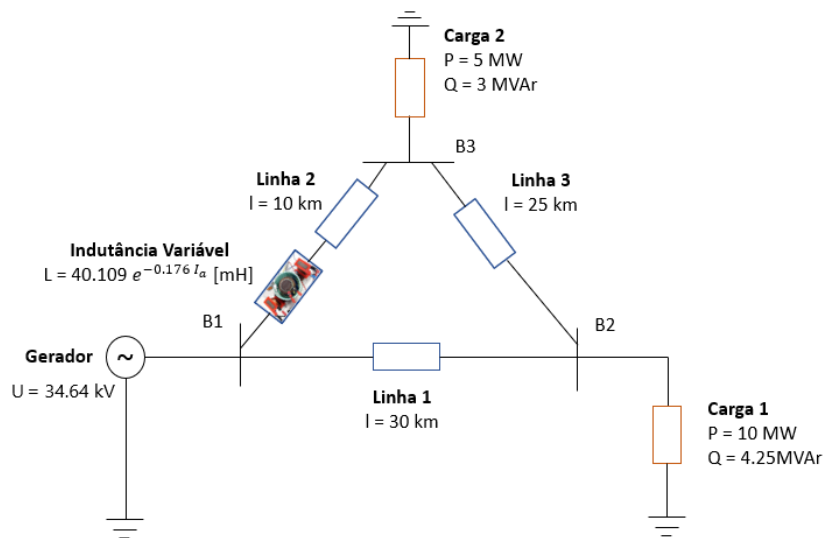


Figura 4.3: Esquema da rede em estudo

## 4.2 Controlo do Sistema

Nesta secção será apresentado o modelo de controlo do RNS com o objetivo de o incorporar na rede dimensionada (4.3). O procedimento de controlo é feito tendo como entrada a corrente da linha de transmissão e como saída a corrente DC necessária para ajustar o RNS. A simulação do RNS em laboratório foi feita a fim de comprovar o controlo do fluxo de corrente na rede.

Numa simulação digital do modelo implementado, que será feita nas secções 4.2.2 e 4.2.3, a corrente na linha não necessita de tratamento pelo que é diretamente transmitida para o microprocessador, bloco onde será tomada a decisão para controlar a eventual sobrecarga na linha.

### 4.2.1 Desenho do Controlo

Na figura 4.4 está representado o esquema que descreve o controlo do sistema. A inclusão do filtro passa-baixo e do integrador na unidade de controlo, tem como objetivo eliminar interferências e frequências elevadas.

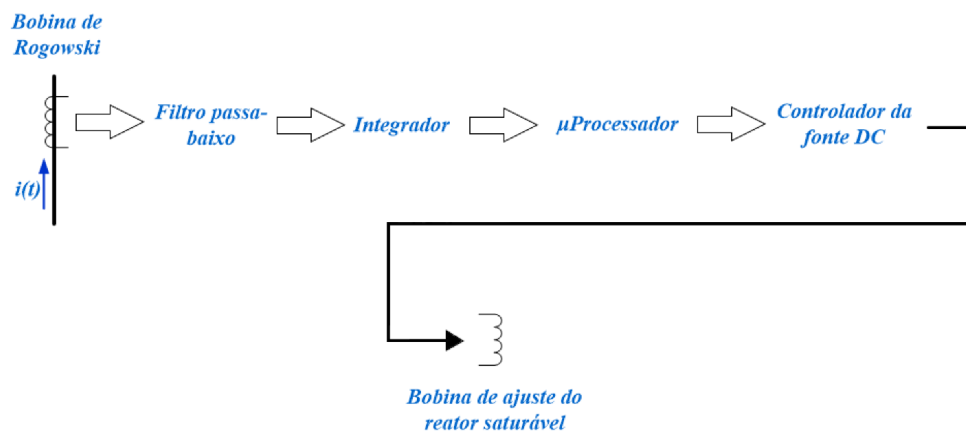


Figura 4.4: Esquema de controlo do SEE

A bobina de *Rogowski* funciona como um sensor que recebe a corrente alternada proveniente da linha de transmissão. Este sinal é submetido a um filtro passa-baixo que elimina o ruído eletromagnético envolvente e passa por um integrador em que a amplitude do sinal de saída é proporcional ao valor da corrente  $i(t)$ .

No microprocessador é feita a comparação entre o valor do sinal lido e o valor máximo que deverá percorrer a linha de forma a determinar se a linha se encontra em sobrecarga. É determinada a expressão da indutância total em função da corrente percorrida na linha de transmissão. O controlador da fonte DC utiliza o valor máximo que deverá percorrer a linha e gera um valor de corrente que será aplicado à bobina de ajuste do RNS. A corrente DC aplicada ao reator de núcleo saturável vai alterar a permeabilidade magnética do núcleo do reator o que implica a alteração da indutância e consequentemente da reactância.

#### 4.2.1.1 Microprocessador e Controlador da Fonte de Corrente DC

No bloco associado ao microprocessador, será implementada uma equação que servirá como relação entre a indutância corresponde à corrente percorrida na linha de transmissão. Com o auxílio do *Simulink* foi implementado o modelo do circuito da figura 4.3 onde a reatância variável foi adicionada no segundo ramo da rede, pois é o caminho que verifica maior corrente. O valor de cada indutância foi determinado manualmente através da equação 3.11 variando os valores da corrente de controlo DC. A partir dessa indutância será possível recorrer à equação 3.11 para determinar a corrente de ajuste DC necessária.

O gráfico da figura 4.5 ilustra o andamento da corrente na linha 2, com a introdução do RNS, em função da indutância para vários valores da corrente de ajuste DC.

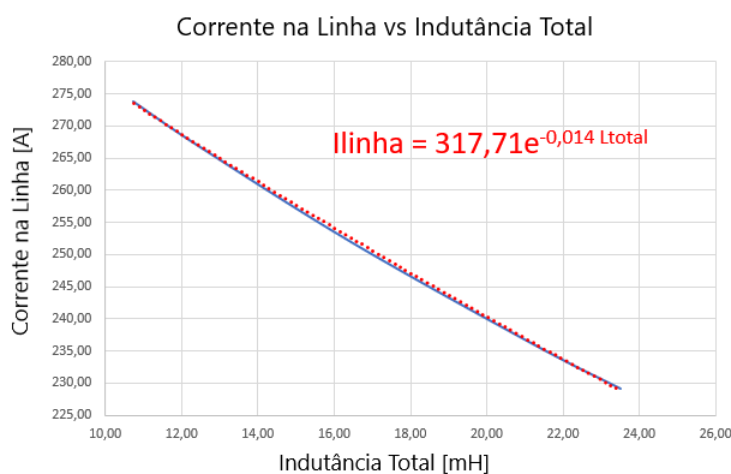
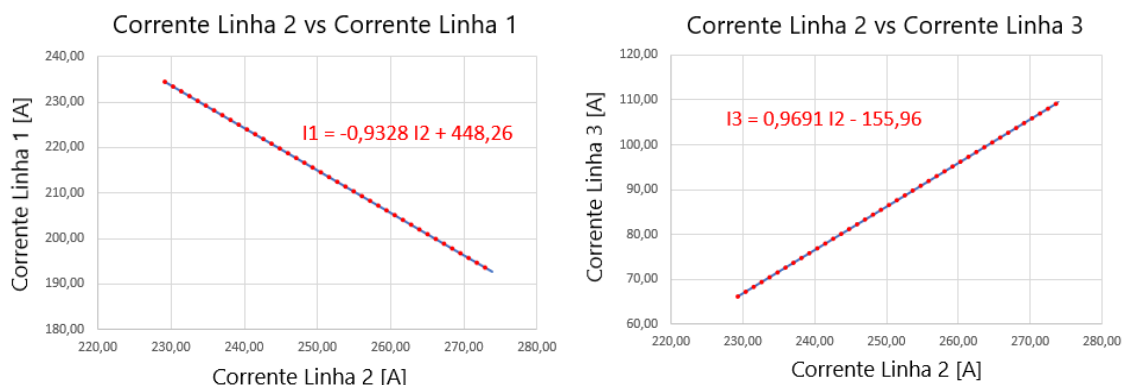


Figura 4.5: Gráfico da corrente na linha 2 em função da variação da indutância

Os gráficos ilustrados na figura 4.6 apresentam o comportamento da linha 1 e da linha 3 em função da corrente percorrida na linha 2.



(a) Corrente na linha 1 em função da variação da indutância (b) Corrente na linha 3 em função da variação da indutância

Figura 4.6: Gráficos para análise do comportamento de cada uma das correntes em cada uma das linhas

Desta simulação resulta a seguinte equação 4.17 que servirá de suporte para determinar a indutância que o RNS terá de apresentar de acordo com a corrente percorrida na linha de transmissão. Pela análise do gráfico, é possível verificar que quanto maior a indutância do reator, menor é a corrente que flui na segunda linha.

$$I_{linha} = 317,71e^{-0,014L_{total}} \quad (4.17)$$

No bloco associado ao controlador da fonte de corrente DC, será efetuado o procedimento do controlo semi-automático do sistema que toma em consideração a curva da variação da indutância do RNS,  $L_{RNS} = 40.109e^{-0.176I_a}$  (3.11) e da curva da corrente na linha em função da indutância total  $I_{linha} = 317.71e^{-0.014L_{total}}$  (4.17).

Na figura 4.7 está ilustrado a indutância da linha, que é fixa ( $L_2 = 9,55$  mH), em série com as duas bobinas laterais do RNS. Em regime normal, ou seja, quando a linha não está em sobrecarga, a indutância do RNS não altera os fluxos da rede. Para um valor de corrente DC injetada na bobina central, as bobinas laterais apresentam uma certa indutância em série com a linha.

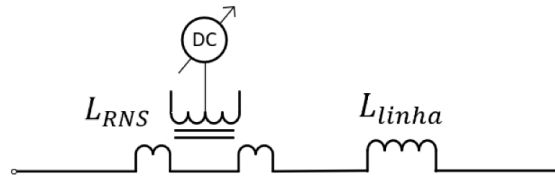


Figura 4.7: Indutância do RNS variável em série com a indutância fixa da linha

Na listagem 4.1, apresenta-se o código Matlab utilizado para decisão do valor da corrente de ajuste a ser aplicada ao RNS de forma a gerar a corrente máxima imposta pela linha.

Listagem 4.1: Função Matlab utilizada para determinar a corrente de controlo DC

```

1 function Ia = controloTeste(Ilinha, Imax)
2 coder.extrinsic('assignin')
3 if Ilinha > Imax
4     Lrns = -(log(Imax/317.71)/0.014)-9.55;
5     Ia = -(log(Lrns/40.109)/0.176);
6 else
7     Ia = 0;
8 end
9 assignin('base','Ia',Ia);%Envia para Workspace
10 end

```

Para análise do estado de sobrecarga, a corrente na linha é comparada com a corrente máxima admissível. Caso a linha se encontre em sobrecarga, é calculada a indutância necessária para a corrente a impor na linha. Por fim, é calculada a corrente de ajuste DC necessária para o RNS gerar essa mesma indutância.

### 4.2.2 Simulação do Sistema de Energia em Matlab

Nesta secção será realizada a simulação do sistema em *Simulink* e é apresentado o modelo da rede, que contém a rede inicial, sem RNS, e a rede final, depois de submetida ao sistema de controlo estudado.

Na figura 4.8 é apresentado o modelo geral de simulação. O primeiro bloco corresponde à rede inicial, que será detalhada na figura 4.9, que é responsável por apresentar os valores iniciais de corrente. Tal como dito anteriormente, o RNS será aplicado à linha 2 e o seu estado de sobrecarga é determinado pelo bloco correspondente ao sistema de controlo. Neste bloco, cuja lógica está ilustrada na secção 4.2.1.1, é recebida a corrente na linha 2 e um valor máximo imposto pelo utilizador. Do controlo do sistema, é apresentada a corrente de ajuste a aplicar ao RNS. O último bloco corresponde à rede final, detalhado na figura 4.11, onde se apresenta o modelo da rede com a indutância variável em série com a linha 2. Deste último bloco, resultam as correntes finais com a introdução do RNS.

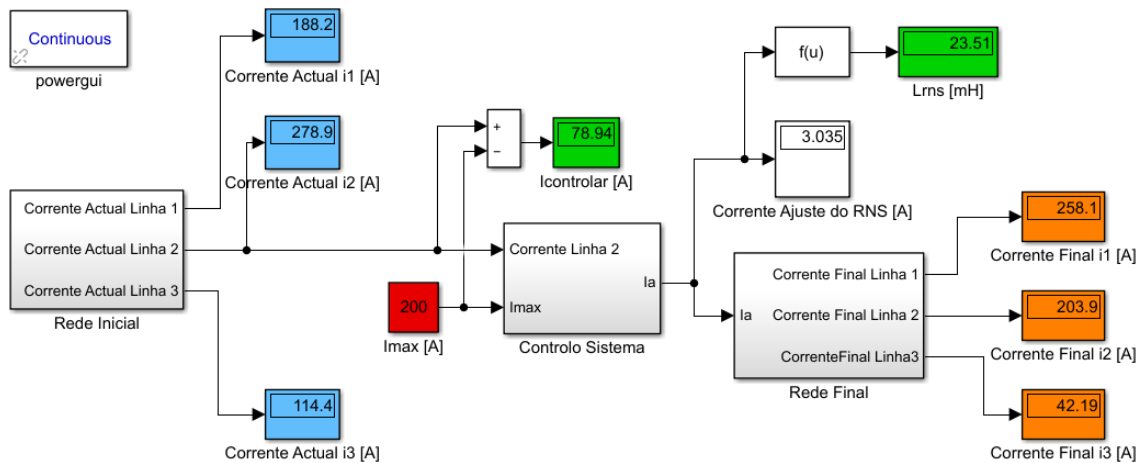


Figura 4.8: Modelo da rede com controlo semi-automático

#### Cenário de sobrecarga

Considerando o cenário de sobrecarga ilustrado na figura 4.8, efetuou-se uma simulação da rede monofásica com uma tensão  $U = 34,64$  kV. Partindo de uma corrente inicial na linha 2 de  $I_2 = 278,9$  A, correspondente a  $S_2 = 9,66$  MVA, de forma a simular uma sobrecarga da linha, considerou-se no sistema de controlo uma corrente máxima  $I_{max} = 200$  A (correspondente a  $S_{max} = 6,93$  MVA). Isto implica uma corrente a controlar de  $\Delta I = 78,94$  A, para uma potência  $S = 2,73$  MVA. Posto isto, no bloco associado ao controlo do sistema, é apresentada a indutância necessária  $L_{RNS} = 23,51$  mH para que a linha seja percorrida pelo seu máximo. Consequentemente é apresentada a corrente de ajuste DC  $I_a = 3,04$  A para que o RNS consiga produzir essa indutância para controlar a sobrecarga da linha.

O modelo da rede inicial, com o valor das cargas e características das linhas ilustradas nas tabelas 4.1 e 4.2, apresenta-se na figura 4.9. Para as medições de tensão e corrente foram utilizados blocos de medida do *Simulink*.

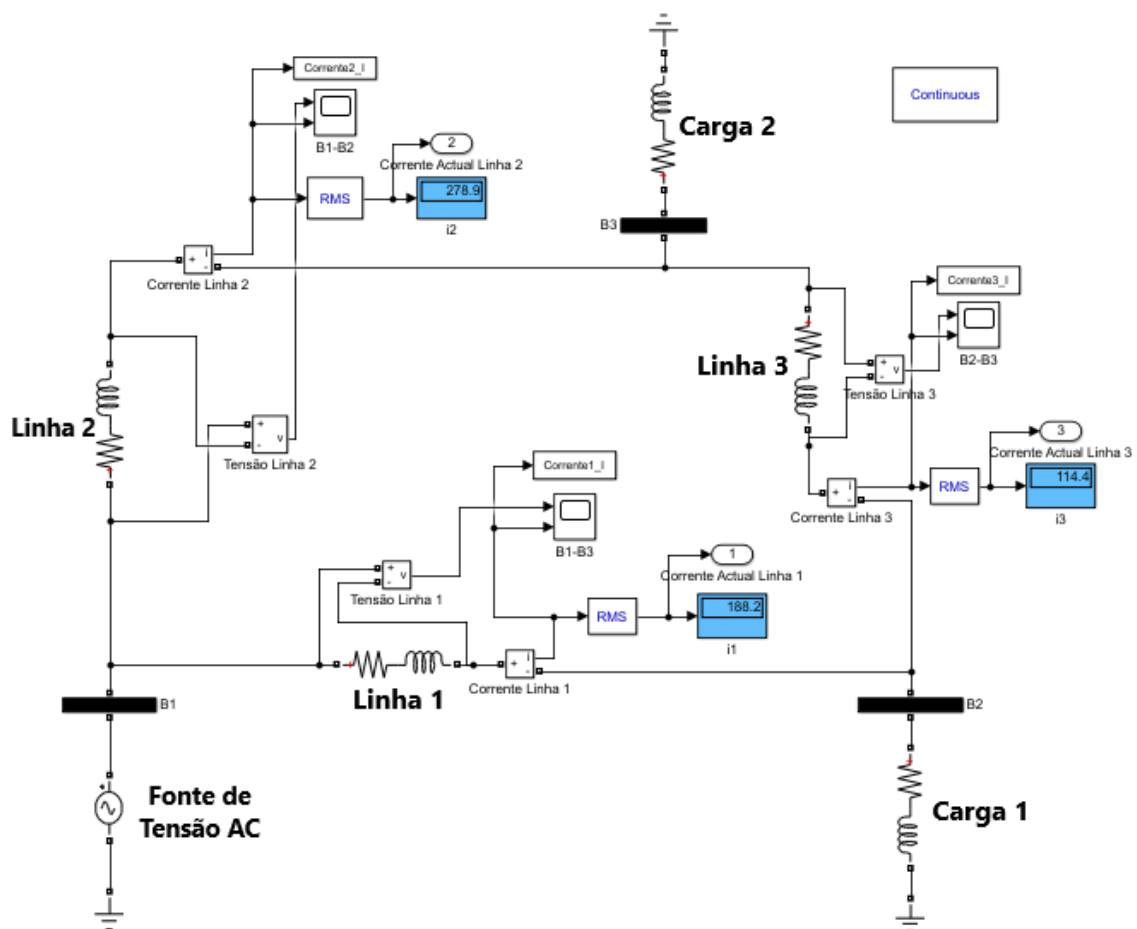


Figura 4.9: Modelo da rede inicial em *Simulink*

As correntes iniciais RMS em cada uma das linhas apresenta-se na tabela 4.6

Tabela 4.6: Correntes nas linhas do modelo da rede inicial

Correntes Iniciais		
Linha 1 [A]	Linha 2 [A]	Linha 3 [A]
188,2	278,9	114,4

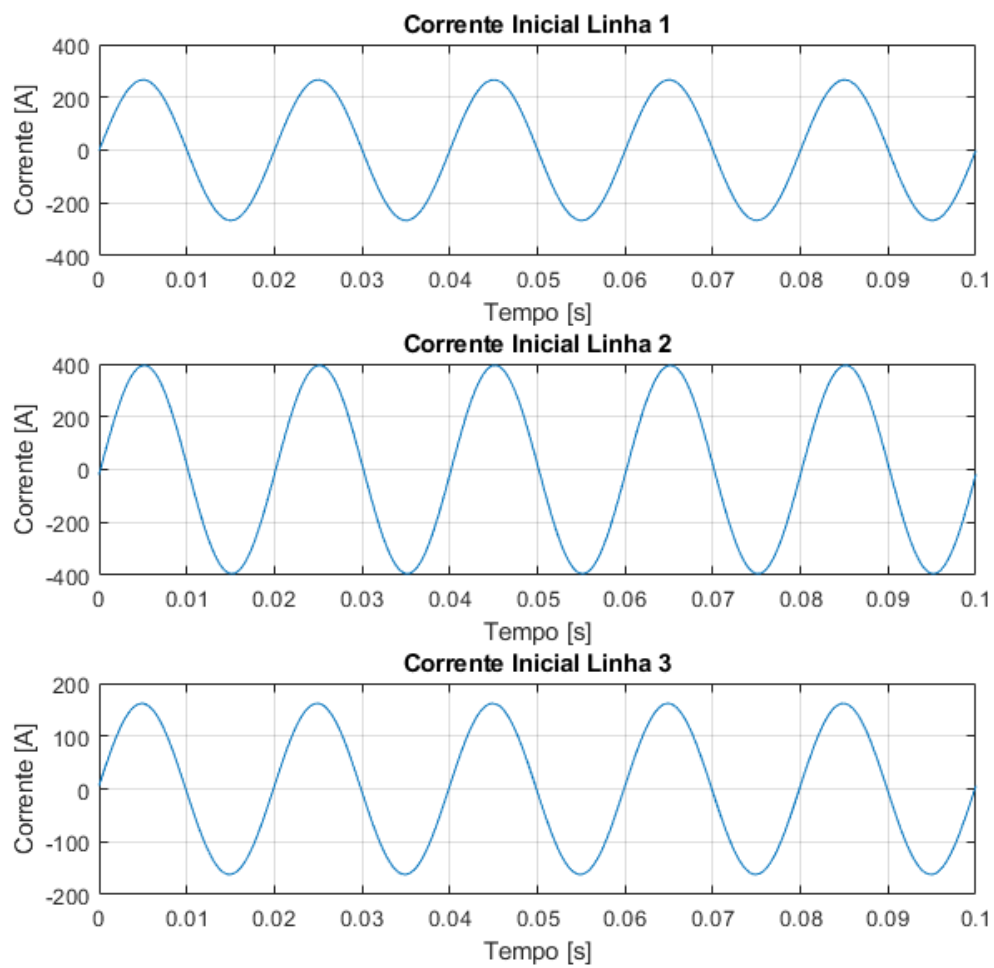


Figura 4.10: Evolução das correntes iniciais em cada uma das linhas



O fluxo de potência ativa e reativa em cada uma das linhas apresentam-se na tabela 4.7 Estas potências foram determinadas através da tensão no barramento emissor e a corrente percorrida na respetiva linha.

Tabela 4.7: Potências transitadas no modelo da rede inicial

Potências Transitadas					
Linha 1		Linha 2		Linha 3	
$P_{12}$ [MW]	$Q_{12}$ [MVar]	$P_{13}$ [MW]	$Q_{13}$ [MVar]	$P_{32}$ [MW]	$Q_{32}$ [MVar]
5,853	2,870	8,484	4,625	3,590	1,501
$P_{21}$ [MW]	$Q_{21}$ [MVar]	$P_{31}$ [MW]	$Q_{31}$ [MVar]	$P_{23}$ [MW]	$Q_{23}$ [MVar]
-5,747	-2,551	-8,407	-4,391	-3,557	-1,403

As respetivas potências aparentes em cada uma das linhas apresenta-se na tabela 4.8

Tabela 4.8: Potências aparentes iniciais em cada uma das linhas

Linha 1	Linha 2	Linha 3
$S_{12}$ [MVA]	$S_{13}$ [MVA]	$S_{32}$ [MVA]
6,519	9,663	3,891

A potência aparente na segunda linha corresponde a  $S_2 = 9,66$  MVA, como foi imposta uma potência máxima de  $S_{max} = 6,93$  MVA, de forma a simular uma sobrecarga, é possível concluir que uma potência de  $S = 2,73$  MVA a ser controlada.

No modelo da rede final, é introduzida a indutância variável na linha 2, como se ilustra na figura 4.11. Para esta simulação, considerou-se um valor máximo de corrente  $I_{max} = 200$  A, como está ilustrado no modelo da figura 4.8. O valor da indutância variável é determinado pela equação 3.11 que varia de acordo com a corrente de ajuste DC, determinada pelo sistema de controlo 4.1.

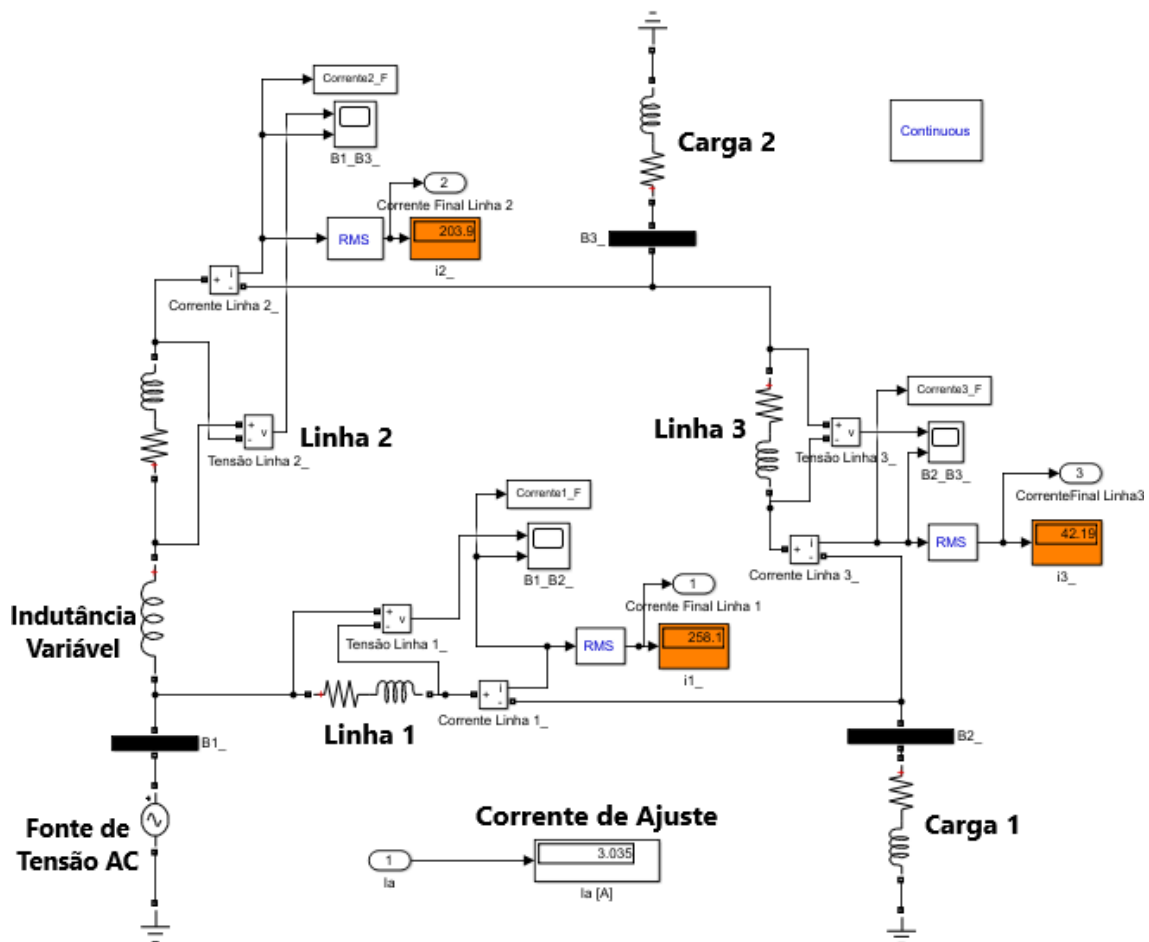


Figura 4.11: Modelo da rede final em *Simulink*

A corrente em cada uma das linhas após a introdução do RNS apresenta-se na tabela 4.9

Tabela 4.9: Correntes nas linhas do modelo da rede após introdução do RNS

Correntes Finais		
Linha 1 [A]	Linha 2 [A]	Linha 3 [A]
258,1	203,9	42,2

Por comparação da tabela 4.6 das correntes iniciais, é possível concluir que para a segunda linha foi controlada uma corrente  $\Delta I = 75$  A.

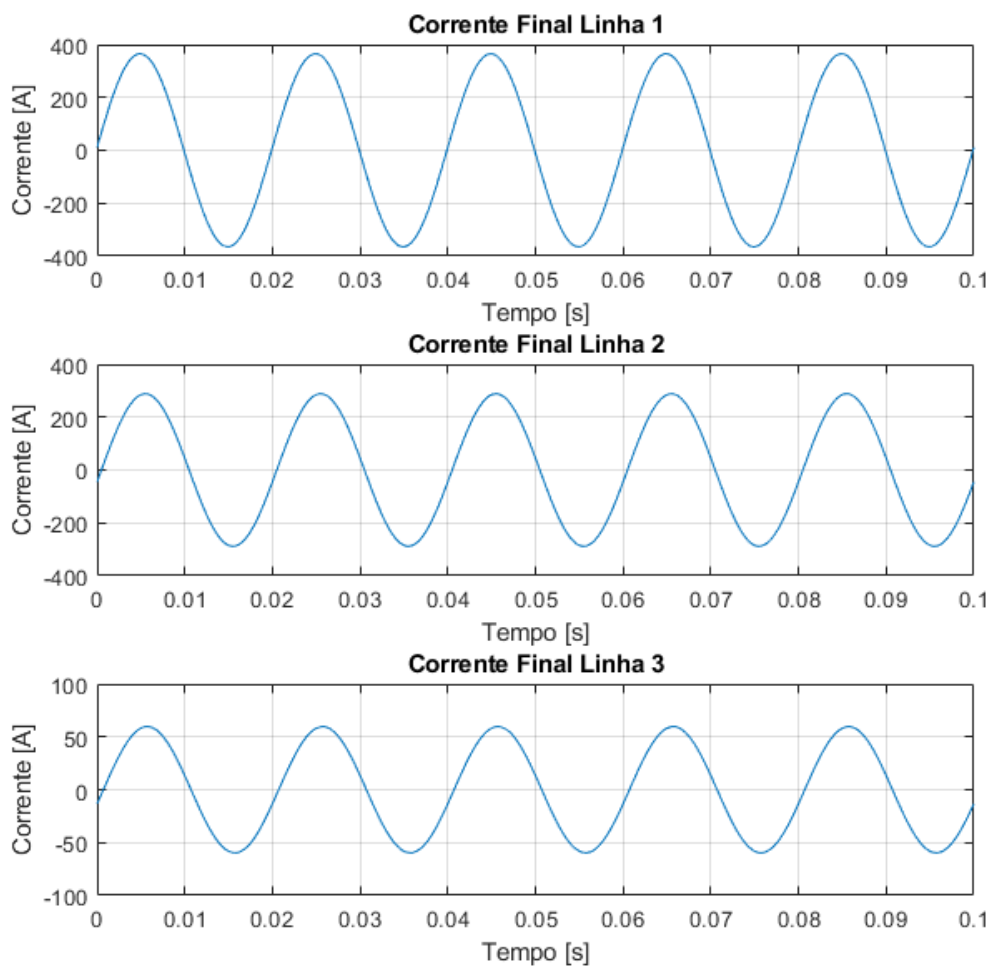


Figura 4.12: Evolução das correntes em cada uma das linhas depois da introdução do RNS

O fluxo de potência ativa e reativa do barramento emissor para o barramento recetor em cada uma das linhas apresentam-se na tabela 4.10. É de salientar que o barramento 1 é onde se encontra a geração, no barramento 2, encontra-se a carga 1 e no barramento 3, encontra-se a carga 2.

Tabela 4.10: Potências transitadas no modelo da rede final

Potências Transitadas					
Linha 1		Linha 2		Linha 3	
$P_{12}$ [MW]	$Q_{12}$ [MVar]	$P_{13}$ [MW]	$Q_{13}$ [MVar]	$P_{32}$ [MW]	$Q_{32}$ [MVar]
8,161	3,653	5,801	4,030	1,138	0,825
$P_{21}$ [MW]	$Q_{21}$ [MVar]	$P_{31}$ [MW]	$Q_{31}$ [MVar]	$P_{23}$ [MW]	$Q_{23}$ [MVar]
-7,961	-3,054	-5,759	-3,598	-1,133	-0,811

Tabela 4.11: Potências aparentes finais em cada uma das linhas

Linha 1	Linha 2	Linha 3
$S_{12}$ [MVA]	$S_{13}$ [MVA]	$S_{32}$ [MVA]
8,941	7,063	1,405

Para uma corrente  $I_2 = 278,9$  A, correspondente a  $S_2 = 9,66$  MVA, foi imposta uma corrente máxima de  $I_{max} = 200$  A, correspondente a  $S_{max} = 6,93$  MVA, o que resulta numa corrente a controlar de  $\Delta I = 78,94$  A com ( $S_I = 2,73$  MVA).

Depois da rede ser submetida ao RNS, de forma a controlar esta sobrecarga, resultou uma corrente final na segunda linha de  $I_2 = 203,9$  A, correspondente a  $S_2 = 7,06$  MVA que controlou uma corrente  $\Delta I = 75$  A correspondente a  $S_I = 2,6$  MVA.

O que ficou por controlar uma corrente na segunda linha de  $I_{dif} = 3,9$  A e uma potência a controlar de  $S_{dif} = 0,13$  MVA.

Os gráficos da evolução da tensão e corrente antes e depois da introdução do RNS em cada um dos barramentos estão ilustrados nas figuras 4.13, 4.14, 4.15.

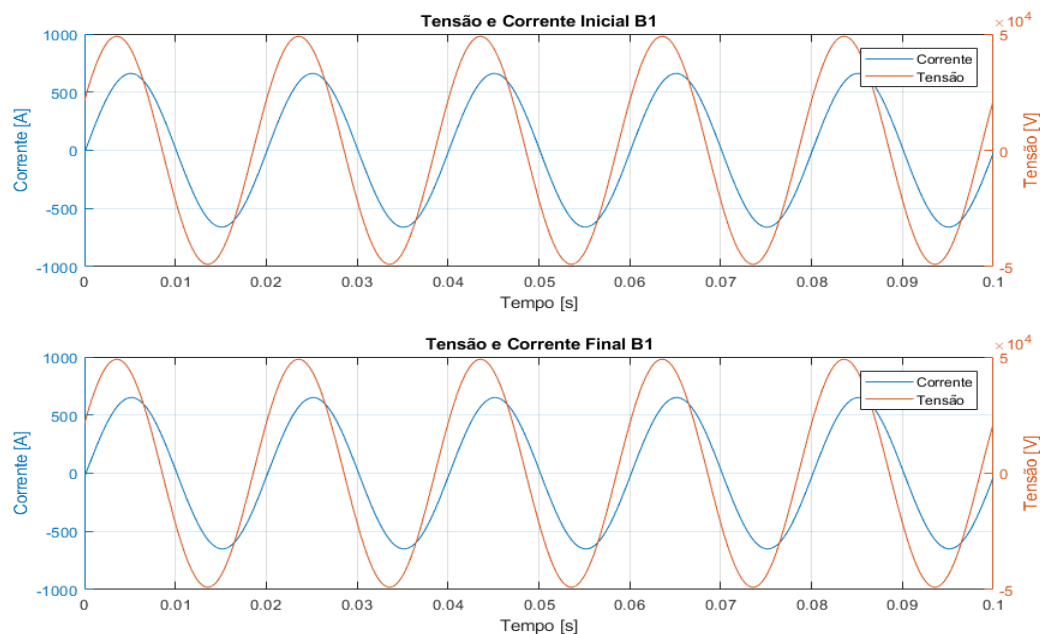


Figura 4.13: Gráfico da tensão e corrente inicial e final do B1

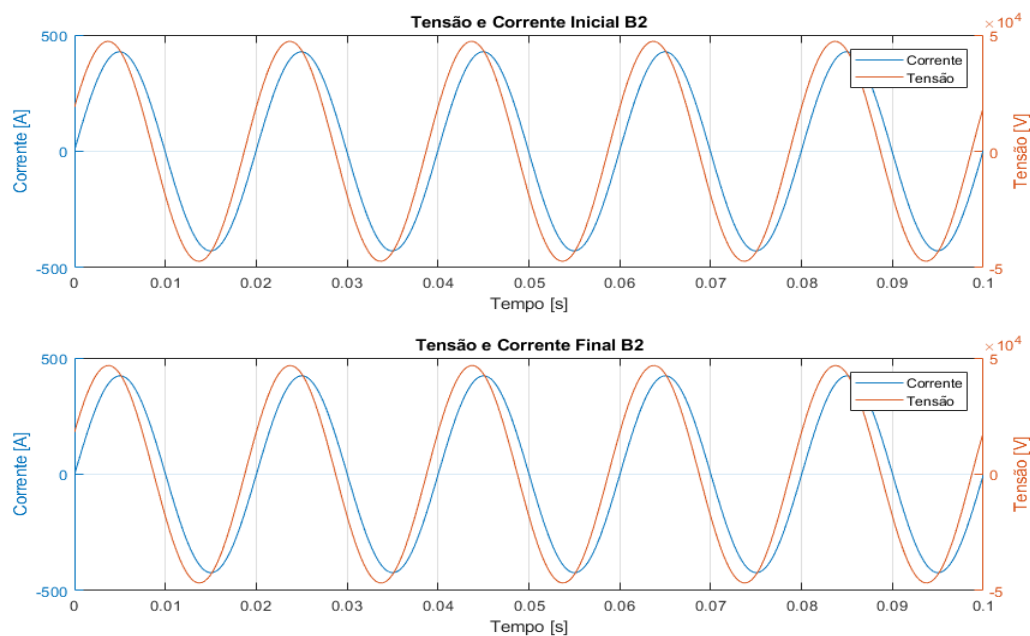


Figura 4.14: Gráfico da tensão e corrente inicial e final do B2

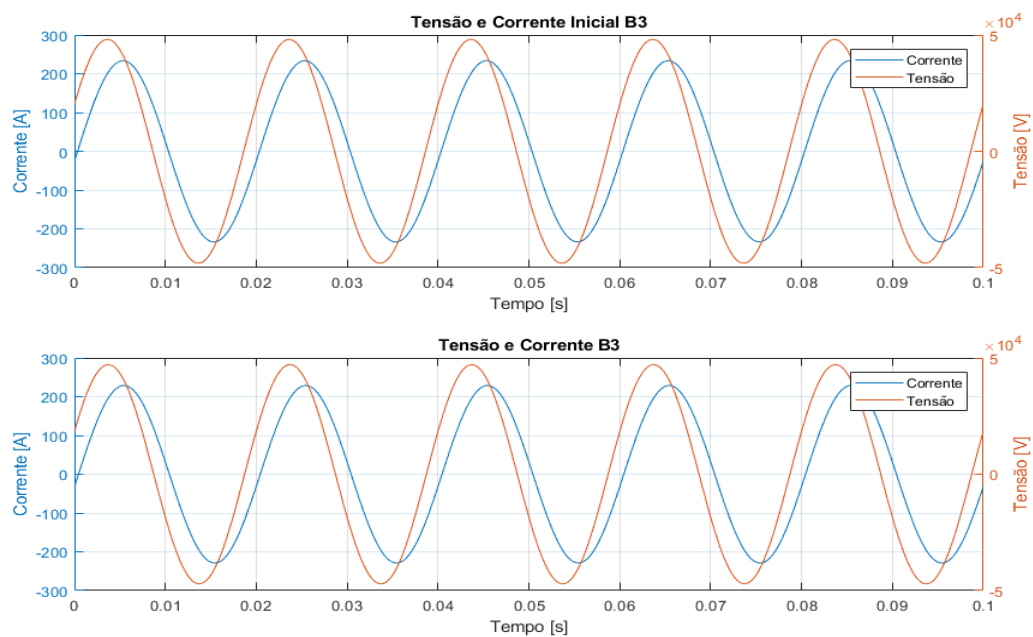


Figura 4.15: Gráfico da tensão e corrente inicial e final do B3

Pela análise dos gráficos é possível concluir que as tensões iniciais e finais em cada um dos barramentos mantêm-se dentro dos parâmetros de segurança e qualidade. Com a introdução do RNS, constata-se que não houve alterações significativas na dinâmica do sistema.

### 4.2.3 Simulação do Sistema de Energia em *Open Loop* com o HyperSIM

O R&D Nester possui um laboratório, ilustrado na figura 4.16, baseado num simulador de sistemas de energia em tempo real (RTPSS - *Real Time Power System Simulator*) que analisa o comportamento de diferentes componentes do sistema e avalia o desempenho de vários cenários [20]. Para a simulação do modelo da rede na presente dissertação, o sistema de energia foi submetido à técnica *Open Loop*<sup>1</sup> através do *software* HyperSIM.



Figura 4.16: Laboratório Nester [20]

A rede monofásica construída no HyperSIM, *software* utilizado nos testes efetuados pelo Nester, apresenta-se na figura 4.17 em que o valor da impedância de cada uma das linhas foram os utilizados na tabela 4.1, tal como os valores de geração e carga representados na tabela 4.5. Para a simulação da rede neste *software*, foi necessário utilizar um bloco *POW* que define a referência do sistema controlando o tempo de simulação. Para o controlo do sistema, foi utilizado um bloco de código C, onde se encontram as equações que fornecem controlo ao sistema (3.11 e 4.17). Desta forma, é possível calcular o valor da indutância que ficará em série com a linha de transmissão.

---

<sup>1</sup>Técnica de simulação de sistemas em que a ação de controlo é independente do sinal de saída do processo.

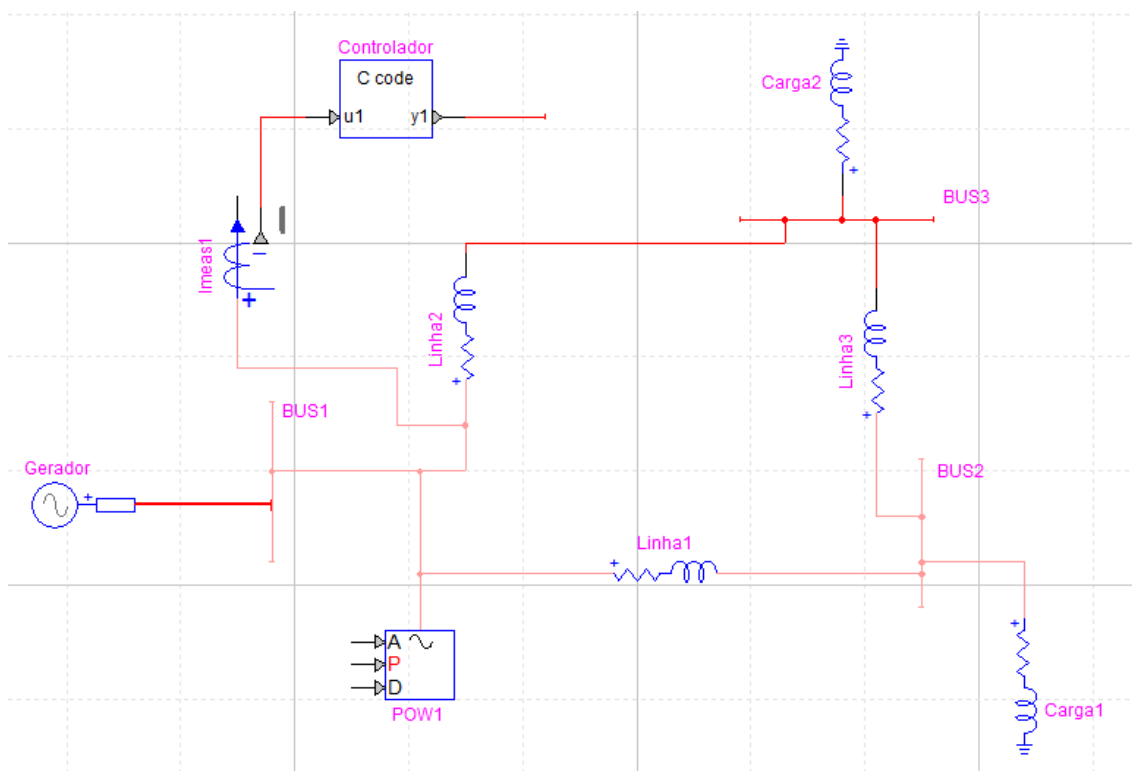


Figura 4.17: Modelo da rede no software HyperSIM

De seguida, foi determinado o fluxo de potência da rede antes da introdução do RNS, bem como o valor da tensão e corrente em cada um dos barramentos. O mesmo foi feito para um ambiente de simulação após a introdução do RNS.

Tabela 4.12: Tensão e potências geradas e consumidas em cada um dos barramentos

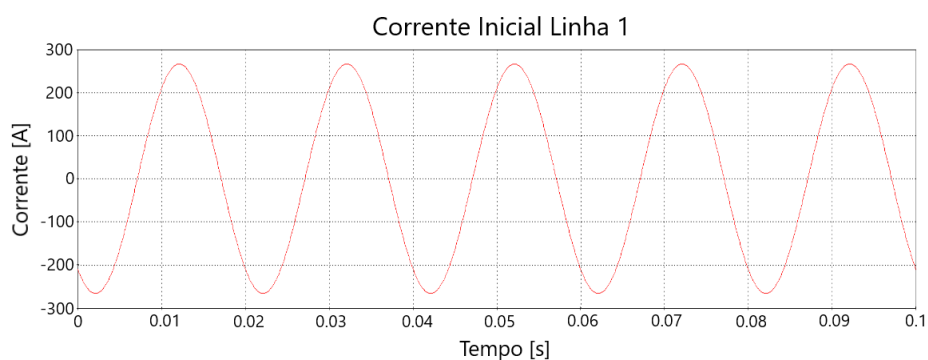
		U [kV]	U [pu]	$\phi$ [°]	P [MW]	Q [MVar]
<b>Geração</b>	B1	34,64	1,000	0,000	14,338	7,495
<b>Cargas</b>	B2	33,41	0,965	-2,183	9,304	3,954
	B3	34,00	0,982	-1,013	4,817	2,89

Resultando nas correntes iniciais de cada linha ilustradas na tabela 4.13.

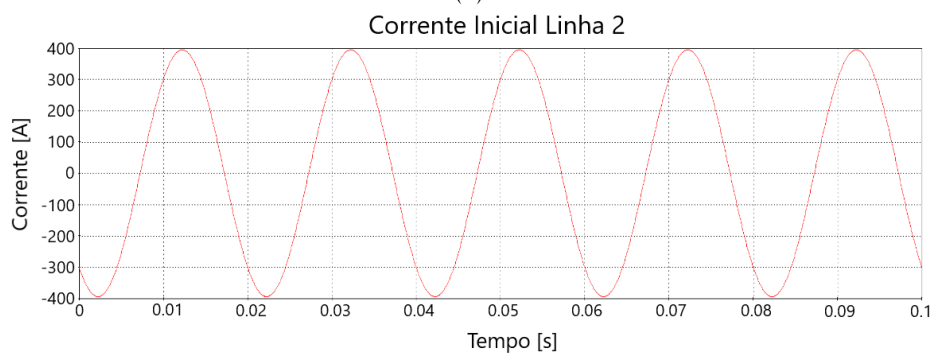


Tabela 4.13: Correntes iniciais na rede

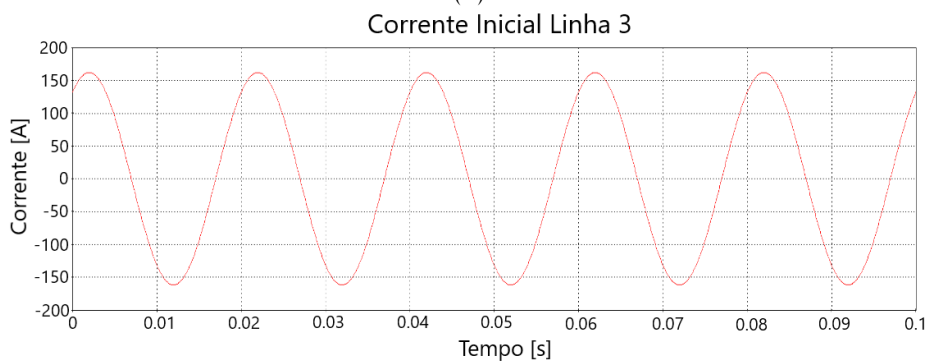
Correntes Iniciais		
Linha 1 [A]	Linha 2 [A]	Linha 3 [A]
188,25	278,90	114,40



(a)



(b)



(c)

Figura 4.18: Gráficos para análise do comportamento das correntes iniciais em cada uma das linhas

A potência transitada em cada uma das linhas, apresenta-se na tabela 4.14.

Tabela 4.14: Fluxo de potência da rede base

Potências Transitadas					
Linha 1		Linha 2		Linha 3	
$P_{12}$ [MW]	$Q_{12}$ [MVar]	$P_{13}$ [MW]	$Q_{13}$ [MVar]	$P_{32}$ [MW]	$Q_{32}$ [MVar]
5,855	2,870	8,483	4,625	3,588	1,501
$P_{21}$ [MW]	$Q_{21}$ [MVar]	$P_{31}$ [MW]	$Q_{31}$ [MVar]	$P_{23}$ [MW]	$Q_{23}$ [MVar]
-5,748	-2,551	-8,405	-4,391	-3,556	-1,403

A potência total gerada toma o valor de potência ativa  $P_{gen} = 14,338MW$  e potência reativa  $Q_{gen} = 7,495MVar$ . A potência total consumida  $P_{carga} = 14,121MW$  com uma potência reativa de  $Q_{carga} = 6,488MVar$ .

As perdas de potência ativa e reativa na linha apresentam-se nas seguintes equações:

$$P_L = P_{12} + P_{21} \quad (4.18)$$

$$Q_L = Q_{12} + Q_{21} \quad (4.19)$$

Da aplicação das equações 4.18 e 4.19 resulta  $P_{perdas} = 0,217MW$  com  $Q_{perdas} = 0,651MVar$ .

Das potências aparentes em cada uma das linhas resultou na primeira linha uma potência de  $S_1 = 6,519 MVA$ , na segunda linha  $S_2 = 9,66 MVA$  e na terceira linha  $S_3 = 3,891 MVA$ . Como foi imposta uma potência máxima na segunda linha de  $S_{max} = 6,93 MVA$ , de forma a simular uma sobrecarga, é possível concluir que uma potência de  $S = 2,73 MVA$  terá de ser controlada.

As curvas referentes à evolução da tensão e corrente em cada um dos barramentos, antes da introdução do RNS no sistema, estão ilustradas nas figuras 4.19, 4.20, 4.21.

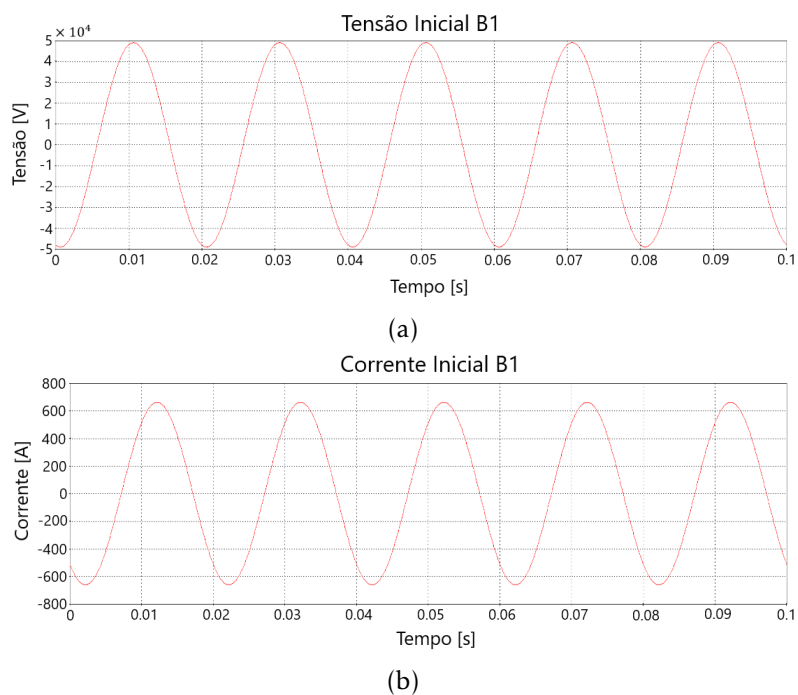


Figura 4.19: Evolução da tensão e corrente inicial no barramento 1, de geração

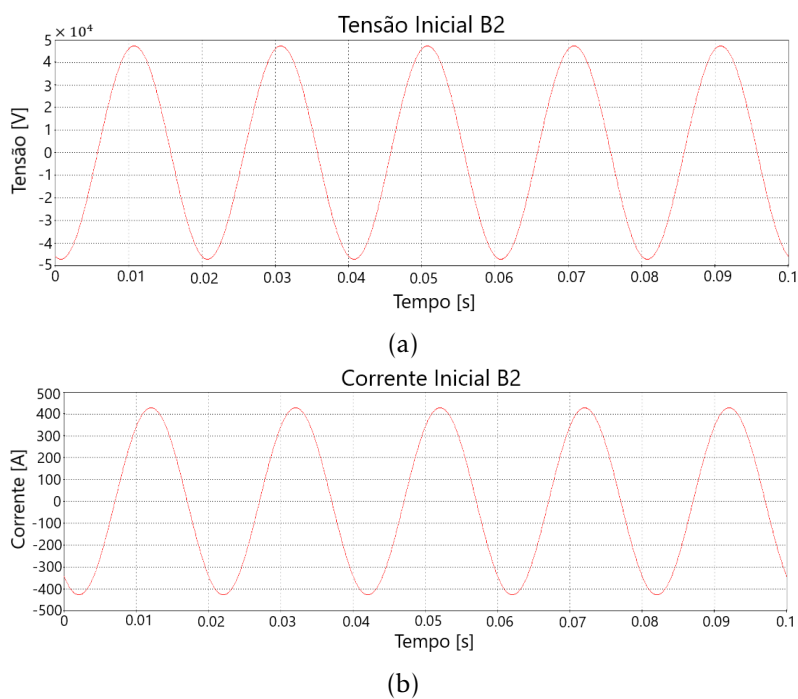


Figura 4.20: Evolução da tensão e corrente inicial no barramento 2, da carga 1

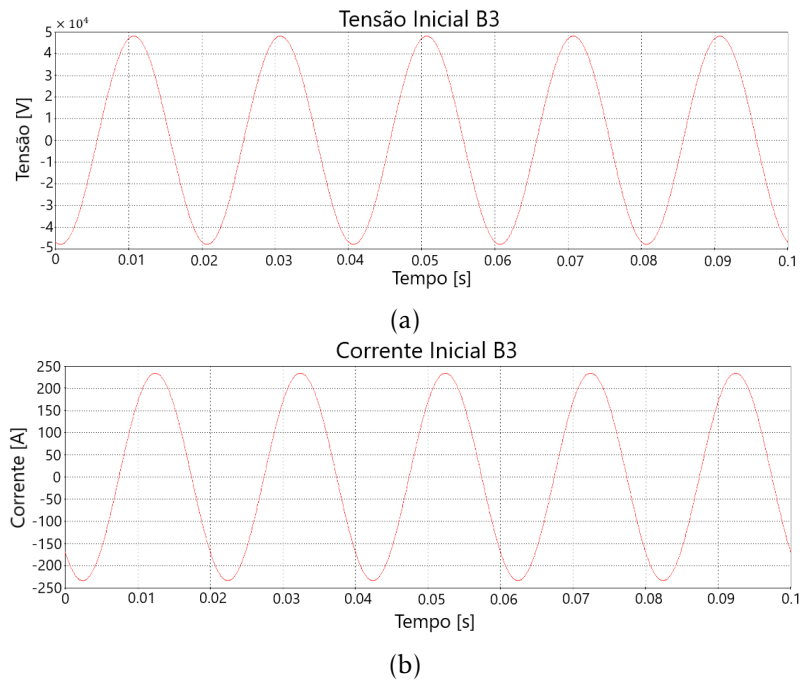


Figura 4.21: Evolução da tensão e corrente inicial no barramento 3, da carga 2

Após a introdução do RNS no modelo da rede, considerando uma corrente máxima  $I_{max} = 200$  A, resultam as potências geradas e consumidas bem como a tensão em cada um dos barramentos.

Tabela 4.15: Tensão e potências geradas e consumidas em cada um dos barramentos após a introdução do dispositivo

		U [kV]	U [pu]	$\phi$ [°]	P [MW]	Q [MVar]
<b>Geração</b>	B1	34,64	1,000	0,000	13,962	7,683
<b>Cargas</b>	B2	33,04	0,954	-3,130	9,094	3,865
	B3	33,31	0,961	-2,793	4,622	2,773

As correntes resultantes da introdução do RNS no modelo da rede, apresentam-se na tabela 4.16.

Tabela 4.16: Correntes resultantes na rede após a introdução do RNS

Correntes Finais		
Linha 1 [A]	Linha 2 [A]	Linha 3 [A]
258,10	203,75	42,19

A evolução das correntes transitadas em cada uma das linhas, após a introdução do RNS no modelo da rede apresenta-se nos gráficos da figura 4.22.

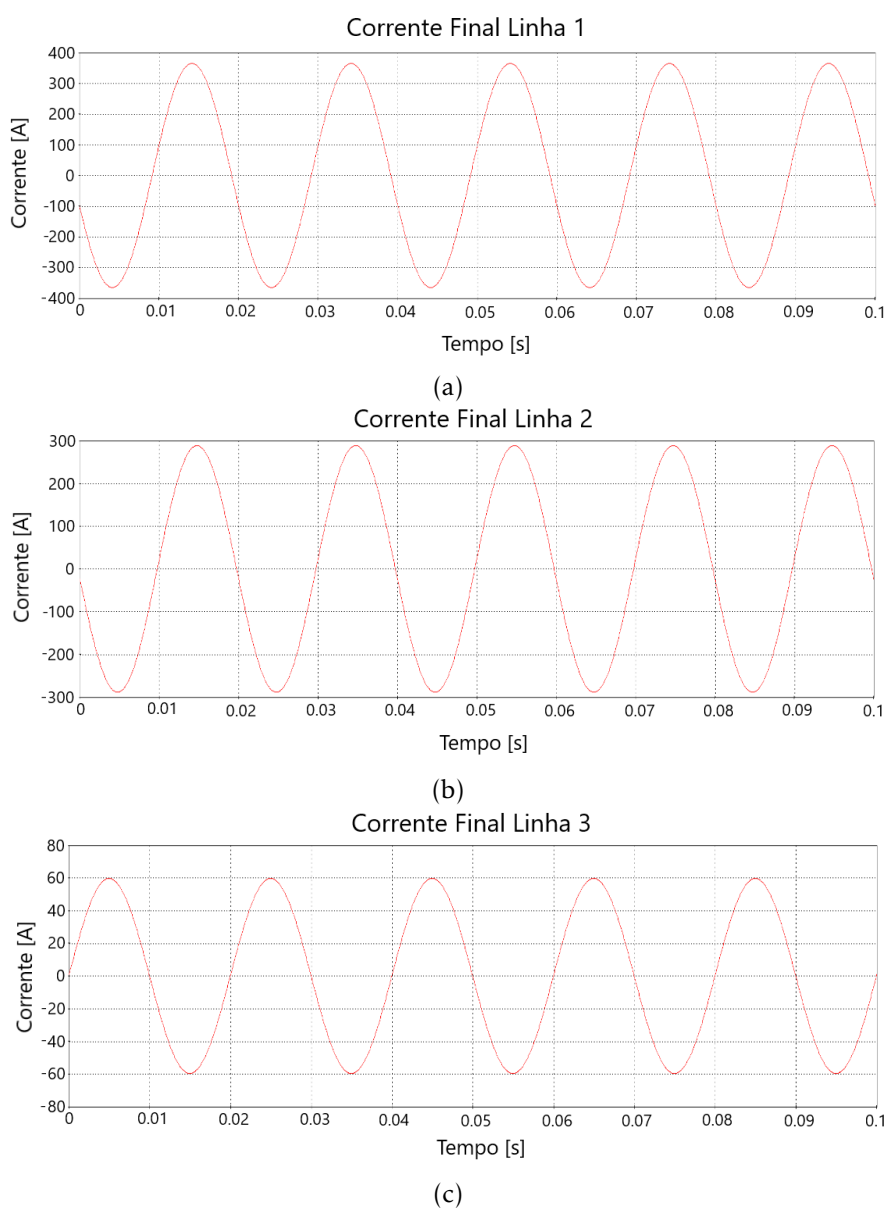


Figura 4.22: Gráficos para análise do comportamento das correntes finais em cada uma das linhas

O fluxo de potência após a introdução do RNS, está ilustrado na tabela 4.15.

Tabela 4.17: Fluxo de potência após a introdução do RNS

Potências Transitadas					
Linha 1		Linha 2		Linha 3	
$P_{12}$ [MW]	$Q_{12}$ [MVar]	$P_{13}$ [MW]	$Q_{13}$ [MVar]	$P_{32}$ [MW]	$Q_{32}$ [MVar]
8,16	3,653	5,802	4,03	1,138	0,825
$P_{21}$ [MW]	$Q_{21}$ [MVar]	$P_{31}$ [MW]	$Q_{31}$ [MVar]	$P_{23}$ [MW]	$Q_{23}$ [MVar]
-7,961	-3,054	-5,76	-3,598	-1,134	-0,811

A potência total gerada toma o valor de potência ativa  $P_{gen} = 13,962MW$ , potência reativa  $Q_{gen} = 7,683MVar$ . A potência total consumida  $P_{carga} = 13,717MW$  com uma potência reativa de  $Q_{carga} = 6,638MVar$ . A potência de perdas de ativa como reativa foi calculada recorrendo às equações 4.18 e 4.19, resultando,  $P_{perdas} = 0,246MW$  com  $Q_{perdas} = 1,045MVar$

As potências aparentes finais, resultam para cada uma das linhas, em  $S_1 = 8,94$  MVA, na segunda linha  $S_2 = 7,06$  MVA e na terceira linha  $S_3 = 1,41$  MVA.

Como a potência nominal da segunda linha foi definida para  $S_{max} = 6,93$  MVA, depois da rede ser submetida ao RNS, resultou numa potência  $S_2 = 7,06$  MVA, que ficou por controlar uma potência de  $S_{dif} = 0,13$  MVA. Os resultados obtidos, são semelhantes aos resultados da secção 4.2.2, pelo que os resultados obtidos se verificam.

As curvas relativas à evolução da tensão e corrente em cada um dos barramentos, depois da introdução do RNS na rede, estão ilustradas nas figuras 4.23, 4.24, 4.25.

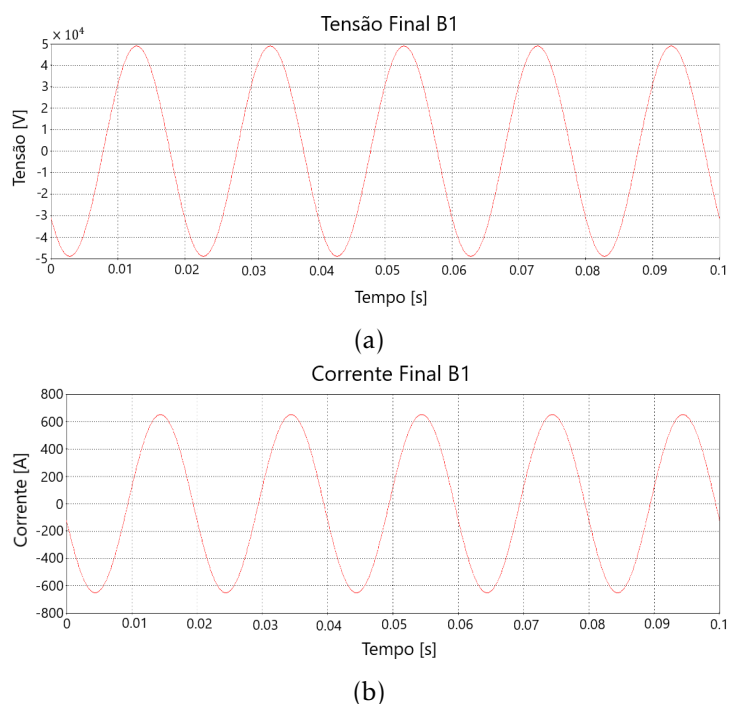


Figura 4.23: Evolução da tensão e corrente final no barramento 1, de geração

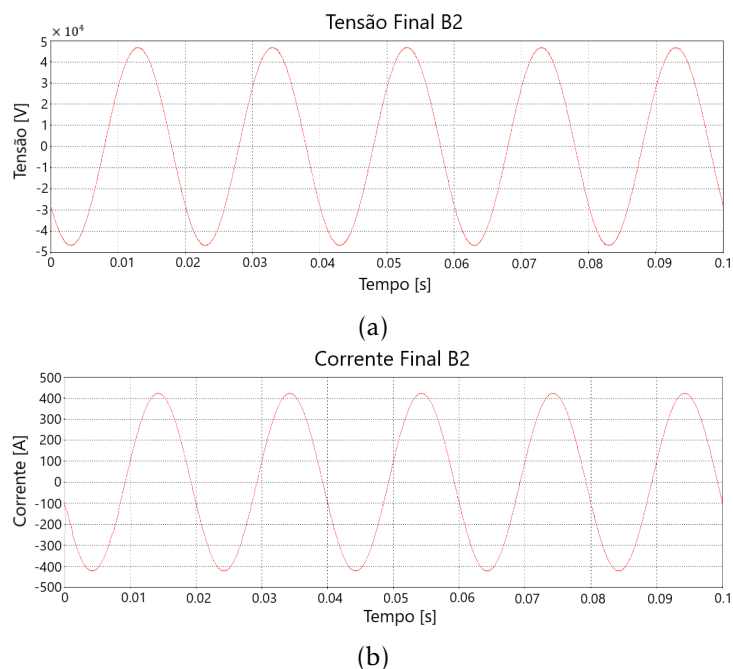


Figura 4.24: Evolução da tensão e corrente final no barramento 2, da carga 1

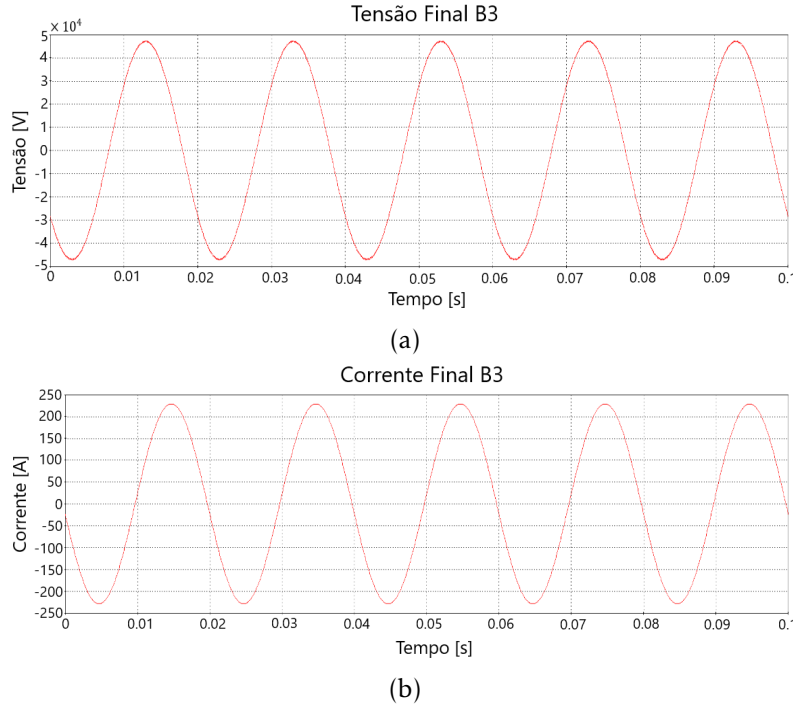


Figura 4.25: Evolução da tensão e corrente final no barramento 3, da carga 2

#### 4.2.4 Conclusão

Pela análise dos resultados obtidos no *Simulink*, na secção 4.2.2, e pelos resultados obtidos através do *HyperSIM*, na secção 4.2.3, constata-se a validação de resultados. Para a mesma potência nominal na segunda linha do modelo da rede, definida em cada um dos *software*, foram obtidos os mesmos resultados. No entanto, o dispositivo de núcleo magnético de ferro laminado, apresenta algumas limitações devido às perdas de relutância do entreferro. Posto isso, foram consideradas as seguintes restrições:

$$I_a \in [1; 10]A$$

$$L_{RNS} \in [7, 80; 34, 50]mH$$

$$L_{total} \in [17, 35; 44, 05]mH$$

$$I_{max} \in [196, 00; 284, 84]A$$

A corrente de ajuste do RNS atinge um máximo de corrente de 10 A. A indutância produzida pelo RNS terá um máximo associado de  $L = 34,50$  mH (3.11). A indutância total presente na linha está compreendida  $L_{total} \in [17, 35 ; 44, 05]mH$  dado que a segunda linha possui uma indutância  $L_2 = 9,55$  mH. Dadas estas limitações, o valor máximo a impor na linha varia entre  $I_{max} \in [196, 00 ; 284, 84]A$ . Todos estes valores têm em consideração a rede base estudada.



## CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO

### 5.1 Conclusões

A presente dissertação surge no âmbito da necessidade do controlo de potência nas redes de energia elétrica. Ao controlar o fluxo de potência nas linhas de transmissão, as perdas são minimizadas e a capacidade de transporte é aumentada. Na rede, o controlo da sobrecarga nas linhas de transmissão pode ser feito através da gestão da potência ativa fornecida pelos grupos geradores, pela gestão da potência do lado da carga ou pela alteração dos parâmetros das linhas de transmissão.

Esta dissertação propõe uma solução para o problema do controlo do fluxo de energia com base num dispositivo eletromagnético. Este dispositivo é controlado através da magnetização do núcleo ferromagnético que proporciona uma variação da reatância do enrolamento AC. Para que este dispositivo opere na gestão do trânsito de energia, deve ser ligado em série com a linha de transmissão de maneira a modelizar a sua indutância.

Foram estudados dois materiais possíveis para constituir o núcleo ferromagnético, ferrite e ferro laminado. Para cada um dos materiais foram testadas duas configurações possíveis, a bobina lateral em série com a linha ou as bobinas laterais em série com a linha de transmissão. Depois de efetuados os testes em laboratório para cada uma das configurações, foi comprovado que o RNS de ferro laminado com as bobinas laterais em série com a linha de transmissão, possibilita maior gama de variação de indutância em relação às restantes configurações.

Foi igualmente implementado um sistema de controlo de forma a corrigir um eventual cenário de sobrecarga da linha. Este sistema permite determinar a corrente de ajuste DC necessária para que o RNS apresente a indutância desejada.

Através das simulações do modelo do sistema com o auxílio do *Simulink* e do *HyperSIM*, confirmou-se que o RNS cumpre os objetivos propostos, uma vez que o seu acionamento permite reduzir a carga numa linha, possibilitando um grau adicional do controlo do fluxo a nível operacional ou podendo contribuir para adiar investimentos em reforços da rede na ótica de implementação.

### 5.2 Trabalho Futuro

Nesta secção são apresentadas algumas sugestões de trabalho futuro.

- Nas implementações do capítulo 3 foram apresentadas três tipologias diferentes para determinar a que melhor se adequa ao controlo do fluxo de energia numa REE. No entanto, não foi implementada uma tipologia possível, que consiste no RNS de ferro laminado com a bobina central em série com a linha de transmissão. Para uma possível implementação desta configuração são necessárias duas fontes de alimentação DC com capacidade de débito de corrente até 80 A.
- O sistema foi simulado no *HyperSIM* com recurso a uma técnica *open loop*. No entanto, de forma a obter resultados de simulação mais realistas, o sistema poderia ser submetido a uma técnica HIL (*hardware in the loop*), de forma a operar num ambiente próximo do real.
- Testar o equipamento numa rede de maior dimensão, de forma a testar de forma complementar a aplicabilidade do dispositivo.
- Estudar o comportamento do dispositivo em regime transitório.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] S. REN Rede Elétrica Nacional. “PDIRT - Plano de Desenvolvimento e Investimento da Rede Nacional de Transporte 2016-25”. Em: (2016).
- [2] J. P. S. Paiva. *Redes de Energia Elétrica: Uma Análise Sistêmica*. Em: IST Press, 2015.
- [3] V. M. Awasth e V. A. Huchche. “Reactive power compensation using D-STATCOM”. Em: *2016 International Conference on Energy Efficient Technologies for Sustainability, ICEETS 2016* (2016).
- [4] R. Wall. “Intelligent Application of Flexible AC Transmission System Components in an Evolving Power Grid”. Em: *Theses and Dissertations* (2018).
- [5] V. R. Patel, A. M. Patel e M. V. Patel. “POWER SYSTEM STABILITY ENHANCEMENT USING STATIC SYNCHRONOUS SERIES COMPENSATOR ( SSSC )”. Em: *International Journal of Advance Engineering and Research* (2015).
- [6] U. V. Aleem, C. H. Mallareddy, S. S. Pitre e S. S. Bakshi. “Static Synchronous Series Compensator ( SSSC ) as Stability Booster of a Power System”. Em: *International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT)* (2017).
- [7] N. A. Daw. “Choosing the Best Place of Static Var Compensator in IEEE 14 Bus System to Improve Voltage using Neplan Software”. Em: *2019 19th International Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (STA)* (2019).
- [8] M. T. Bina e D. C. Hamill. “A Classification Scheme for FACTS Controllers”. Em: (2003).
- [9] T. Tayyebifar, M. Shaker e M. Aghababaie. “Improving the Voltage Profile and Reactive Power of the Wind Farm based Fixed Speed Wind Turbine with using STATCOM”. Em: *Ninth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies* (2014).
- [10] D. Patel, P. Universiy, A. Umer e P. Universiy. “A REVIEW ON INCORPORATION OF UNIFIED POWER FLOW CONTROLLER ( UPFC ) FOR POWER FLOW CONTROL International Journal of Advance Engineering and Research ”. Em: (2018).
- [11] S. W. Inc. “SmartValve™ 2000-3600”. Em: *Specifications, Technical* (2018).
- [12] S. W. Inc. “Flexible and Efficient Solutions for an Increasingly Uncertain Grid”. Em: (2018).

- [13] M. A. I. Young. "Saturable Reactor for Power Flow Control in Electric Transmission Systems : Modeling and System Impact Study". Em: *PhD diss., University of Tennessee* (2015).
- [14] A. Dimitrovski, Z. Li e B. Ozpineci. "Magnetic Amplifier-Based Power-Flow Controller". Em: *IEEE Transactions on Power Delivery* (2015).
- [15] X. Zhang. "Electric Power System Operations with a Variable Series Reactor". Em: *PhD diss., University of Tennessee* (2017).
- [16] M. V. Neves. "Apontamentos sobre Circuito Magnético". Em: (2013).
- [17] A. Pronto. "Análise de perdas em sistemas de energia que empregam materiais supercondutores de alta temperatura". Em: *PhD* (2010).
- [18] Philips. "DATA SHEET - 3C90 Ferrite Ceramics". Em: (2000).
- [19] V. Nogueira. *Como usar linhas de tendência para previsão de dados*. URL: <https://www.portal-gestao.com/artigos/7898-como-usar-linhas-de-tendencia-para-previsao-de-dados.html> (acedido em 27/08/2019).
- [20] *R&D Nester - LABORATÓRIO*. URL: <http://www.rdnester.com/pt-PT/lab/> (acedido em 16/07/2019).
- [21] N. M. Vilhena. "Construção e Ensaio de Um Limitador de Corrente Supercondutor de Núcleos Saturados". Em: (2012).



## I.1 Dimensionamento do Dispositivo

O dispositivo estudado na presente dissertação foi desenvolvido em [21].

O núcleo ferromagnético tem um formato EI, as colunas exteriores têm secção retangular e a coluna central tem secção aproximadamente circular. A travessa superior e inferior têm a mesma secção das colunas exteriores sendo a travessa superior amovível. O núcleo é constituído por 115 chapas de aço com uma espessura de 0.5 mm cada. As bobinas AC são colocadas nas colunas exteriores do núcleo de ferro e são constituídas por dois suportes em acrílico. Em cada suporte os enrolamentos primários são de cobre com isolamento de verniz, de  $1\text{mm}^2$  de secção, com 45 espiras. Em cada suporte existe um enrolamento extra, com 80 espiras de cobre com isolamento de verniz e  $0,5\text{mm}^2$  de secção. Este enrolamento extra destina-se à medição do fluxo magnético no núcleo da bobina. A bobina central DC tem 52 espiras e satura o núcleo ferromagnético na zona das colunas onde as bobinas AC estão inseridas.[21]

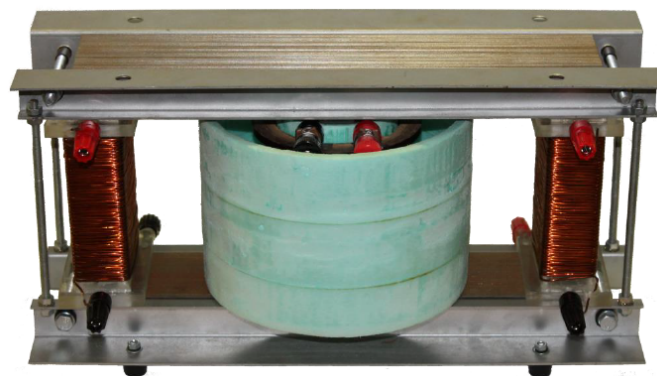


Figura I.1: Protótipo desenvolvido por [21]

## I.2 Desenho RNS

O desenho em milímetros do RNS de ferrite apresenta-se ilustrado na figura I.2.

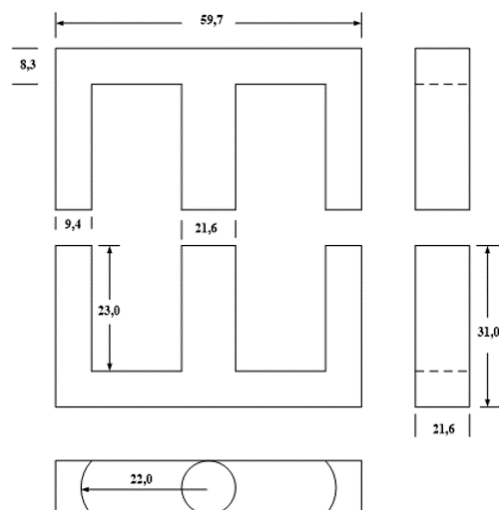


Figura I.2: Ilustração do RNS de ferrite

O desenho em milímetros do RNS de ferro laminado apresenta-se ilustrado na figura I.3.

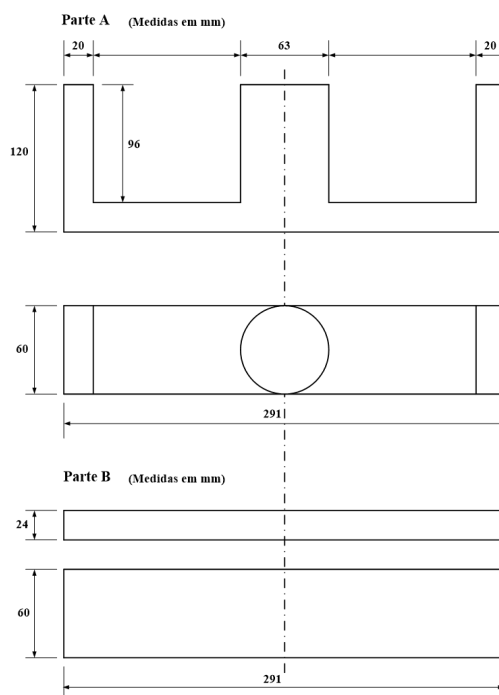


Figura I.3: Ilustração do RNS de ferro laminado

## I.3 Código Matlab

Figura I.4: Interface gráfica de desenvolvimento do ambiente de simulação

### Listagem I.1: Código Matlab

```

1 clear all;
2 close;
3 clc;
4
5 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%Tratamento dos Parâmetros da Rede%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
6 prompt = {'X [\Omega/km]', 'R [\Omega/km]', 'l_{1} [km]', 'l_{2} [km]',
7 'l_{3} [km]', 'P_{Carga 1} [MW]', 'Q_{Carga 1} [MVar]', 'P_{Carga 2} [MW]',
8 'Q_{Carga 2} [MVar]'};
9 dlgtitle = 'Menu';
10 opts.Interpreter = 'tex';
11 answer = inputdlg(prompt, dlgtitle, [1 25],
12 {'', '', '', '', '', '', '', '', ''}, opts);
13
14 Xlinha = str2double(answer{1});
15 Rlinha = str2double(answer{2});
16 Comp1 = str2double(answer{3});
17 Comp2 = str2double(answer{4});
18 Comp3 = str2double(answer{5});
19 P1 = str2double(answer{6});
20 Q1 = str2double(answer{7});
21 P2 = str2double(answer{8});
22 Q2 = str2double(answer{9});
23
24 %%%%%%%%%% GERADOR %%%%%%%%%%
```

```
25 %Potência Aparente S[MVA]
26 Sger = (48e6)/3;
27 %Potência Ativa ou útil P[MW]
28 Pger = Sger*0.9;
29 %Tensao Gerada [kV]
30 Vger = ((60e3)*sqrt(2))/sqrt(3); %valor pico
31
32 %%%%%%%%%% LINHA 1 %%%%%%%%%%%%%%
33 %Reatância Indutiva da Linha [Ohm/km] 0,3 m ohm
34 xL1 = Comp1*Xlinha;
35 %Indutância ou coeficiente de auto-indução
36 L1 = xL1/(2*pi*50);
37 %Resistência da Linha R = 0,1 [Ohm/km]
38 R1 = Comp1*Rlinha;
39
40 %%%%%%%%%% LINHA 2 %%%%%%%%%%%%%%
41 %Reatância Indutiva da Linha [Ohm/km] 0,3 m ohm
42 xL2 = Comp2*Xlinha;
43 %Indutância ou coeficiente de auto-indução
44 L2 = xL2/(2*pi*50);
45 %Resistência da Linha R = 0,1 [Ohm/km]
46 R2 = Comp2*Rlinha;
47
48 %%%%%%%%%% LINHA 3 %%%%%%%%%%%%%%
49 %Reatância Indutiva da Linha [Ohm/km] 0,3 m ohm
50 xL3 = Comp3*Xlinha;
51 %Indutância ou coeficiente de auto-indução
52 L3 = xL3/(2*pi*50);
53 %Resistência da Linha R = 0,1 [Ohm/km]
54 R3 = Comp3*Rlinha;
55
56 %%%%%%%%%% CARGA 1 %%%%%%%%%%%%%%
57 Vn = (60e3)/sqrt(3); %nominal
58
59 %Potência Ativa ou útil P[MW]
60 Pcarga1 = P1*10^6;
61 %Potência Reativa Q[MVAr]
62 Qcarga1 = Q1*10^6;
63
64 %%%%%%%%%% CARGA 2 %%%%%%%%%%%%%%
65 %Potência Ativa ou útil P[MW]
66 Pcarga2 = P2*10^6;
67 %Potência Reativa Q[MVAr]
68 Qcarga2 = Q2*10^6;
```

---